外研社·哈佛科学人文译丛

GALILEO



伽利略的钟摆

——从时间的节律到物质的制造



（美）罗杰·G．牛顿 著
路本福 苗蕾 译

外语教学与研究出版社

外研社·哈佛科学人文译丛



伽利略的钟摆

Galileo's Pendulum

From the Rhythm of Time to the Making of Matter

（美）罗杰·G．牛顿 著
路本福 苗蕾 译

外语教学与研究出版社
北京

图书在版编目(CIP)数据

伽利略的钟摆／罗杰·G. 牛顿著；路本福，苗蕾译．— 北京：外语教学与研究出版社，2007.4
(外研社·哈佛科学人文译丛)
ISBN 978-7-5600-6522-9

Ⅰ. 伽… Ⅱ. ①罗… ②路… Ⅲ. 时间—节律—研究 Ⅳ. P19

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2007）第 041855 号

出 版 人：李朋义
项目策划：彭冬林 满兴远
责任编辑：程 蕾
装帧设计：牛茜茜
出版发行：外语教学与研究出版社
社　　址：北京市西三环北路 19 号（100089）
网　　址：http://www.fltrp.com
印　　刷：北京画中画印刷有限公司
开　　本：787×1092 1/16
印　　张：9
版　　次：2007 年 4 月第 1 版 2007 年 4 月第 1 次印刷
书　　号：ISBN 978-7-5600-6522-9
定　　价：19.00 元

*　　*　　*

出版说明

20世纪的文化是以现代科学为基础的文化，21世纪的文化则将是科学精神与人文精神高度融合的文化。这已是学界的共识之一。

秉承我社“记载人类文明，沟通世界文化”的一贯理念，我们组织翻译了这套“外研社·哈佛科学人文译丛”，目的有两点：其一，在于搭建一个阅读平台，让国际上最高端的科学教育读物能在最短时间内进入中国；其二，在科学与人文的两极之间“执两用中”，寻索那些最能将科学精神与人文精神相融合的优秀图书，并推荐给中国的读者。

“外研社·哈佛科学人文译丛”将涵盖在21世纪人类所无法回避的那些最基本、最重大的问题：诸如生命科学、量子力学、全球气候变暖、宇宙起源、开源软件，等等。哈佛大学出版社在世界范围内遴选的这些一流作者，将为中国的读者提供他们在这些命题上的最新思考。而所有这些思考，回答的无非是三个终极问题：我们从哪里来？我们是谁？我们往哪里去？

相信这套丛书将会为我们每个人在面对这些问题时提供新的启示与灵感。

外语教学与研究出版社

2006年12月

TO **BENJAMIN,**

WHOSE TIME HAS JUST BEGUN

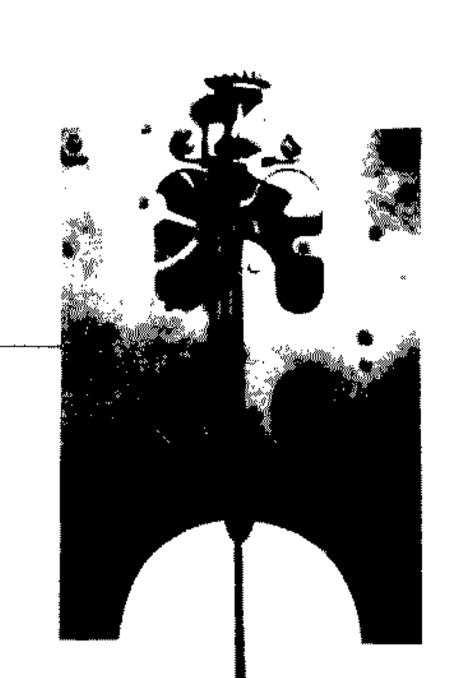
仅以此书献给**本杰明**，他的时代才刚刚开始



自　序

这是一本关乎远古历史和现代科学的书。虽然它的主题并不是希腊神话，但其目的却可以理解为是要描述特耳西科瑞——司舞蹈与韵律的缪斯——对我们生活的广泛影响，以及科学是如何通过“伽利略的钟摆”成功地驯服了被欧里庇得斯称为“无法测量又狂放不羁”的时间。钟摆摆锤的周期性运动对现代科学和数学的发展产生了非同寻常的影响。这种影响最终不仅扩散到了我们对所有随时间变化的自然现象的理解，而且改变了科学对于整个物质世界存在的认知观点——组成我们所能触摸到的物质的粒子，以及我们赖以感受到周围环境的声与光。当特耳西科瑞借助科学的力量，最终颠覆了她的父亲——宇宙的主宰，强大的宙斯——的时候，希腊神话才臻于完美。

我要感谢两位生物学家戴维·基欧和阿瑟·科克，感谢他们对生物学领域相关问题的探讨，以及给予我的宝贵建议。作为一名物理学家，我对这些知识一无所知。如果该书的相关领域依然存在这样或那样的不足，那肯定是我自己的过错所造成的，而绝非他们的原因。当然，我还要感谢我的妻子露丝，她在该书的编辑上给予了我慷慨的协助。



引　言

他那时只有17岁，早已厌倦了比萨大教堂庆祝活动的弥撒曲。这名年轻的医学院学生正在寻找一些可以吸引其注意力的东西，这时，他的目光停在了高悬于天花板下的树枝形吊灯上。吊灯挂在一条长长的细链上，在和煦的春风里轻轻地来回摆动着。年轻人的好奇心被触动了，他想知道吊灯来回摆动一次的间隔会是多久，于是，他开始用自己的脉搏为吊灯的摆动计时。他惊奇地发现，无论是处于几乎纹丝不动的状态，还是在春风的吹拂下产生大幅度摆动的情况下，吊灯完成一次来回摆动所经历的脉搏跳动次数竟然是一样的。这位具有敏锐观察力的年轻人注定了会为人类带来更多的重大发现，他的名字就叫伽利略。

正如其传记作者文森罗·维维亚尼所说，关于伽利略是如何发现简单钟摆的等时性的传说无疑是杜撰的，但无论是他发现了这种特性的事实，还是这种发现在此后几个世纪里对我们的文明所产生的深远影响，都是我们无可否认的。这是一本关于时间节律的书，它向我们讲述了时间节律最终是如何通过伽利略的钟摆得以校准的，阐述了钟摆的摆动如何影响了我们对上述节律的认知，以及这种摆动后来是如何被发现存在于许多其他自然现象之中的。

前三章奠定了全书的基础，描述了在钟摆的稳定摆动出现之前就已经存在的时间节律：生命有机体关于日夜更迭的早期印记、各种文明试图理顺阴历和阳历周期关系的历法演变过程，以及直到中世纪才出现的更短的时间间隔

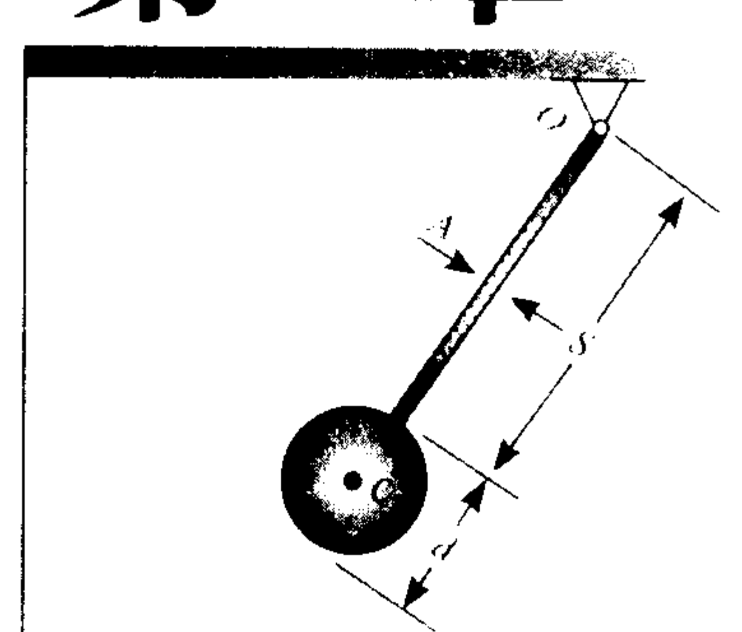
计算方式。无论是大自然用来把节律植入生物体的生理机制，还是人类发明的各种用于记录上帝赋予我们的时间周期的方法，都不会是稳定和精确的。但前者足以让它们获得一种适者生存的优势，使它们成为一个遍布地球的特殊生命形式，至于后者，则亘古以来就恰当地满足了人类的各种需要。

然而，到了文艺复兴之后，商业和科学的飞速发展带来了巨大的压力，人们需要更精确地测量时间。如果人类从来没有发明出一种稳固可靠的时钟，那么西方文明的发展进程将会遭遇严重的阻碍。这种时钟对于大型海上导航和现代科学的发展都是必需的。钟摆以及后来出现的其他类似的机械装置都很好地满足了这一需求。

令人惊奇的是，谐振器——也就是伽利略的钟摆——的物理学原理虽然使得对时间流动的调谐成为可能，但其应用并没有仅仅局限于制造精确的时钟装置。人们发现它不仅仅构成了我们所听到的乐声和所看到的光线颜色的基础，而且也是我们借助量子理论所理解的宇宙结构的基础。如果没有了谐振器，就不会有粒子的存在：没有了可以呼吸的气体，没有了维系生命的液体，没有了构成土地的固体。该书讲述的就是大自然中最简单、但也是最基础的物理系统的故事，你也可以从该书中了解到这种物理系统是如何与时间节律以及我们的真实物质存在紧密地连接在一起的。

目 录

第一章



生理计时:
身体的节律

一块巨石呼啸着，在宇宙中永无休止地飞驰。它既不围绕某颗恒星公转，也没有自身固有的自转轴。当然，也没有绕其旋转的卫星（先别担心这样的一个世界是否缺少维系生命存在的光和热）。这只是一个单调的世界，暂时没有任何变化，没有清晨和夜晚的更迭，也没有春夏秋冬的变迁。

设想在这样一块大石头上，如果存在智能生物的话，他们的生物体内是否会有内置的天然时钟？或者他们是否会有时间流逝的概念？答案很可能会是否定的。我们关于时间流逝的全部想法都是基于对周期性变化的感知，基于永恒重复的日夜更迭（从旭日东升到日薄西山的一段时间形成了白天，而月悬苍穹是夜晚的标志），基于往复呈现的季节变迁。节律是时间的天性，而周期性是我们自身存在不可分割的一部分。

1931 年，美国著名飞行家威利·波斯特独自驾驶单引擎飞机温妮·梅向西飞行，创下环游世界的壮举。波斯特也因此成为了探寻和记录飞行时差感的第一人，这种令人烦恼的现象现在已经广为人知。作为飞行员，他注意到了在不同地理经度上的时间改变所带来的影响，据说他发现了人类身体每天所能够适应的时区变化范围不超过两小时。至于他的这种经历在多大程度上是飞行疲劳所导致的后果，我们就不得而知了。

虽然人体的生理机制并不能对现代时钟的精确性和稳定性起多大作用，但对时间及其节律的感知的确成为了人体机能的重要组成部分。其中我们最为熟悉的莫过于心脏的搏动了，这种有规律的体内节律就与时钟类似。如果传说可靠的话，伽利略就是借助自己脉搏的跳动发现了钟摆定律。这种

定律对其后所有的时间测量装置都产生了意义深远的影响。然而，还有其他的生理计时装置在我们的生活中扮演着至关重要的角色，而且它们的周期要更长一些。所有这些体内计时装置的前行速率虽然各不相同，但它们之间的有机协作却完全是自动完成的。我们现在知道，经过几天时间后，我们体内的生物钟就可以通过重置与一个变化的节律实现完美同步。即便是经历一次从大西洋到太平洋的长途飞行，我们体内生物钟与当地时间的差异也会慢慢消失。

1959年，出现了一个专有名词“昼夜节律系统”（circadian system），用来描述即使在没有外部暗示的情况下，也能以24小时为一个周期记录时间流逝的体内生物钟。在拉丁语中，circa是“大概、差不多”的意思，dies则代表“一天”，由于这种生物钟的周期大概是24小时，所以用这两个单词合成了circadian这个术语。虽然在过去200多年的时间里，生物学家对这种生物钟和其他生物钟多少有所了解，但比较深入透彻的研究却集中在过去的半个世纪里。

在所有受昼夜节律控制的人类生理变量中，科学家首先观察到的是脉搏和体温。即便是不吃不喝，静静地躺在床上，一个人的深层体温在早晚也会存在约1℃的差异，清晨时体温较低，而下午时相对较高。早在150多年前，人们就发现肾脏分泌物的数量在一天之中也会有升有降，这种分泌物可以对血液中一些必需物质的浓度进行调节，比如盐分。这种以24小时为周期的类似生理和心理变量另外还有100多个。比如说，儿童的数字计算速度在清晨时最低，在中午之前较高，在下午的晚些时候降至最低，到了下午6点钟左右达到顶峰，然后到了晚上又开始下降。这期间的速度差距大约为10%。对于儿童计算速度的测量最早是在1907年进行的，

50 年之后又重复了一次，两次测量的结果基本一致。

由此出现了一个颇有争议的问题，那就是人类的昼夜节律在多大程度上是一种自动的机理，而不仅仅是对外部信号的一种反应，比如光线强弱的变化、一日三餐的时间或者我们周围相互作用的社会活动？要得到这个问题的答案绝没有那么简单。在某些情况下，来自外部信号的影响作用是很值得怀疑的，但也是非常难以捉摸的，比如在一天之中时刻变化的电场所可能带来的干扰。尽管如此，在很多科学实验室内，针对人类和非人类物体所进行的严谨实验都得出了一个非常肯定的结论：我们的体内存在一个自动的计时装置。一些志愿者对得出这个答案做出了贡献，他们被人为地长期置于一个与世隔绝的环境中，有时会被关闭在隐蔽的洞穴里，没有任何可以暗示时间的物质存在。1938 年，两名来自芝加哥大学的研究人员在位于肯塔基州猛犸洞穴的一个密室里生活了 32 天；大约 30 年后，一名法国洞穴学者在阿尔卑斯山脉一个位于地下 375 英尺的阴冷洞穴里呆了两个月。每当进食、入睡和苏醒时他都会通过电话告诉地面的支持者。这名法国学者详细记录了自己在洞穴中对于时间流逝的想法和印象。所有这些探险家都发现他们难以摆脱体内时间信号的控制。然而，测量得出的结果却表明，他们身体变量的周期（所有变量之间的协调都非常完美）以及他们对一天时间周期的主观印象、他们睡眠和苏醒的时间间隔都要稍微多于 25 个小时。当他们从长期的隔离状态回到现实中时，他们体内的生物钟与外部 24 小时时钟的差距已经长达数个小时了。

这里有两个问题必须区分清楚：一个是生物钟前行的“速度”（节律周期的决定性因素），另一个是在给定时间内生物钟节律的“相位”。在从纽约到洛杉矶的飞行中，即便戴的

是一块非常精准的手表，在到达目的地后也会出现三个小时的相位变化，所以必须重新设置时间。而走得慢的手表——也就是说，手表前行的速度滞后了——会随着时间的流逝在相位上与精准计时装置出现越来越大的相位差异；由于其节律周期要比精准参照时钟的周期长，所以要让其正确地显示时间，必须不时地对其进行重新设置。

人们一般认为心理上的激发响应反应不会随时间的变化而变化，但在某些情况下，未知昼夜节律的存在会对用于测量激发响应反应的实验造成妨碍。另外，由于内生节律的周期多少与 24 小时有一定的差距，所以要察觉这种妨碍并不总是那么容易：即便是在每天同一时间重复相同的实验，也并不必然能够消除系统误差的存在，该误差是由实验对象的反应变化所带来的，而其反应则取决于一天内进行实验的特定时间。如果有超过一个的节律在起作用（外部信号以及其他略微不同的昼夜节律），实验结果可能会变得非常令人迷惑不解。

现在，生物钟具有自主性已是不争的事实。在与外部环境信号隔绝的情况下，一个人的昼夜节律系统会以均速前行，而且其节律周期会比以 24 小时为周期的一天长一些。如果未处于隔绝状态，人体的昼夜节律系统会随着环境变量——主要是光的强度——持续调整，以便与太阳的循环周期保持同步。换句话说，虽然遵循着一个稳定的速度，但我们体内的生物钟每天都会慢一个小时左右。不过由于生物钟能够随着光线明暗的变换周期持续重置，所以在正常状态下，这种时间的丢失并不会累加，我们体内的生物钟也因此得以与太阳的节律保持一致。

当然了，人类只是大自然中的物种之一，昼夜节律也只

是生物节律中的一种。除了心脏的搏动之外，还有一些体内计时装置的周期要更短一些，它们被称为次昼夜节律，比如说脑电图描记器（EEG）所测量的大脑电场活动的周期仅为0.1秒。不过，也有一些节律的周期要比昼夜节律长，比如说女人的月经周期为28天，调节狗熊冬眠的近年节律则接近一年，我们可以推测，另外一些体内生物钟的周期有可能还要更长一些。看起来有节律的行为应该是大部分生物系统所共有的特性。

萤火虫的同步闪光周期比较短（一般为1秒钟左右，但不同的种类可能会略有不同）。生活在马来西亚和新几内亚的雄性萤火虫常成千上万地聚集在树丛中，它们会非常有节律地同时发出闪烁的光亮，场面相当壮观。人们发现它们各自都有独特的内在次昼夜闪光周期，但当它们大量聚集到一起的时候，所有的萤火虫就会自动把闪光周期调整为同步。（用闪烁的手电筒也可以引发这些萤火虫的同步闪光。）[1]

在有些情况下，某些行为看起来需要周期较长的计时装置，但事实上需要的仅仅是一个昼夜节律系统而已。以加拿大的雪靴兔为例，其皮毛在夏天呈棕色，在冬天则呈白色。为了形成一种保护性伪装，雪靴兔通常会在第一场雪飘落之前开始改变皮毛的颜色。但雪靴兔判断夏天来临所依据的并不是近年节律生物钟，而是一种昼夜节律计时系统，雪靴兔通过该系统记录白天和黑夜的相对数量，从而判断出夏天是否到了。如果在七月份白天的一段时间内把它们的眼睛蒙上，其皮毛变色的开始时间就会提前。其他哺乳动物也会利用近年节律和昼夜节律生物钟来调节新陈代谢和生殖周期，以便在体内积累足够的脂肪抵御冬天的严寒，也能保证幼崽出生在一个比较舒适的季节，而且有充足的食物来源。在上述情

况下，白天的长度也有助于生物节律发挥作用，即使这些节律的周期要比24小时长很多。生活在沿海水域中的某些螃蟹内生有潮汐节律生物钟，可以帮助它们了解极为重要的环境节律——潮汐。还有一些海洋动物的产卵期和繁殖期也会受到体内生物钟的控制，而其生物节律则直接受到月亮圆缺的影响。

1910年，瑞士医生奥古斯特·福雷尔的一个偶然发现揭开了昼夜节律计时系统严肃研究的序幕。医生到自己位于阿尔卑斯山地区的房子避暑，他通常在房子外的露天阳台上吃早饭，不久他就留意到桌子上打开的果酱罐吸引了附近一个蜂房的几只蜜蜂光临。医生并没有太在意，但在接下来的几个早晨，他好奇地发现在早饭准备好之前这些蜜蜂就已经聚集在餐桌旁了，看起来它们在殷切地盼望医生奉上果酱。为了免受这些不速之客的骚扰，医生决定转到房内进餐。奇怪的是，这些蜜蜂依然会在每天的同一时间如期而至，在外面的餐桌旁寻找食物。由于这些蜜蜂从来没有在其他时间造访过他的房子，所以医生得出了一个结论：蜜蜂肯定“对时间有记忆力”。

大约20年后，个体生态学家英格堡·贝林和卡尔·冯·弗里希对进行了个别标记的蜜蜂展开了系统的观测，他们在几天之中的固定时间为这些蜜蜂在固定的地点提供糖水。在进行观测的日子里，他们会把糖水拿走，结果这些研究者发现每一只做有标记的蜜蜂都在原来的地点出现了，并且平时的“训练”时间是蜜蜂出现的高峰阶段（有些蜜蜂选择稍微早那么一点点飞过来）。然而，这种“时间训练”只有在进食间隔为24小时或接近24小时的情况下才会成功，如果间隔改为19小时或者48小时，训练就会以失败告终。为了确

保这些蜜蜂不会察觉到一些实验者忽略的外部线索，贝林将一些实验地点选在了位于地下深处的岩盐坑里。马克斯·伦纳曾在自己位于法国的实验室里训练了一些蜜蜂，让它们习惯于在晚上八点一刻享用食物，而在第二天乘飞机来到大西洋彼岸的纽约市继续实验。结果这些蜜蜂仍然会像往常一样出来寻觅它们的美味佳肴，不同的是它们会在法国时间的晚上八点一刻左右出现。

事实证明，仓鼠和其他啮齿类动物对于研究哺乳动物的昼夜节律非常有用。把它们关在有稳定光源照明的笼子里，不提供任何有关昼夜变化的线索。笼子里放置一个可以用来锻炼的轮子，它们可以自由地嬉戏玩耍。实验结果表明，它们每天都会在几乎相同的时间出来锻炼，而且锻炼持续的时间也几乎完全相同；另外，它们进食和喝水的时间也同样是非常规律的。这些实验表明：在没有外部线索干扰的情况下，很多昼夜节律"习惯"会持续相当长的一段时间，甚至会陪伴动物的一生；当然也有一些"习惯"会比较早地慢慢消失。

在20世纪中期以前，长途迁徙的鸟类那非凡的识途能力一直被认为是一个伟大的奇迹。现在我们知道这些能力至少部分是基于它们的昼夜节律系统。太平洋金斑鸻鸟每年秋天都会跨越2,000多英里从阿留申群岛飞到夏威夷过冬，然后在第二年的春天再飞回阿留申群岛。虽然太阳在一天之内的位置会不断变换，但体内的生物钟让这些鸟类能够追寻太阳的方向飞行：在清晨的时候，让太阳处于身体的左边意味着往南飞；到了下午，则让太阳位于身体的右边。鸟类可以依据一天时间的变化确定太阳所处的位置，第一个通过实验证明鸟类具有这一能力的是动物学家古斯塔夫·克雷默。他在一个圆形的鸟舍里养了一些八哥，太阳光通过墙上的开口

照射到鸟舍内，每到迁徙的季节，绝大部分的八哥都会把栖息的地方对着一个固定的方向，也就是如果没有鸟舍的束缚，它们的迁徙之旅将会遵循的方向。当通过一面镜子突然改变阳光照射的方向时，八哥们也会相应地改变栖息地的朝向，这就说明它们是在借助太阳导航。但如果是在一天的时间内非常缓慢地变换阳光的照射方向，镜子就不会对它们产生影响了，它们体内的昼夜节律生物钟能够帮助它们感觉到太阳的位置移动。

还有一些迁徙的鸟类不仅可以通过太阳导航，甚至还能够在夜晚借助星辰辨别方向，当然，也是依靠其体内的生物钟发挥作用。白喉莺就是依靠这种生物钟每年秋天从北欧飞越亚得里亚海和地中海去埃及过冬的，然后每年春天再飞回北欧。不过，如果不巧遇到阴天多云的夜晚，白喉莺就会变得手足无措了。还有人发现某些特定类型的蚂蚁也可以借助太阳的方向和体内的昼夜节律生物钟每天到相同的地点觅食。但如果把它们关在一个不透光的箱子里，这些蚂蚁就会迷失方向，再次打开箱子把它们放到阳光可以照射到的地方，它们却能够很快地找到原来的方向，继续向前奔赴觅食地点，即使在它们被关起来时太阳已经移动了方向，也并不会影响它们重返征程。

植物体内同样也存在着计时系统。很久以前，人们就已经知道很多植物的叶子或者花朵会在一天的特定时间开放或者闭合。安德斯塞恩斯是亚历山大大帝手下的一名将军，在远征印度的途中，他发现并记录了如下的现象：罗望子树的叶子会在清晨张开，而到了晚上就会合拢起来。很多园丁都注意到了有些花朵的花瓣会在夜晚闭合，到了次日的黎明或者更晚的时候又会重新张开；而金针花每天清晨都会绽放一

朵美丽的小花。18 世纪伟大的植物学家卡罗勒斯·林尼厄斯曾经设计了一个计时花床，把在一天中不同的特定时间开花的花朵有规律地排列起来组成了一个巨大的时钟（参见图 1）。当不同的花朵开放的时候，据推测与花朵共同进化的蜜蜂能够依靠其体内的昼夜节律计时器感触到它们喜欢的花朵，于是它们可以在特定的时间飞来采蜜，而不用浪费时间在不必要的徒劳侦查上了。

那么，植物的这种行为是否只是对白天日光变幻的一种



图1　1751年林尼厄斯设计的计时花床，不同种类花朵的花瓣会在特定的时间张开和闭合。

简单反应呢？或者是植物体内的某种生理系统造成了这种现象？为了找到问题的答案，法国天文学家德梅朗对含羞草进行了研究，就像印度的罗望子树一样，含羞草的叶子也会在夜晚闭合，而到了第二天早晨又重新展开。1729年，他向法国皇家学院报告了自己的研究发现：含羞草叶子的展开和关闭并不需要依靠日光的昼夜变化；即便是在一片漆黑的情况下（他曾经长时间地把含羞草放置在一个黑暗的房间里），它的叶子仍然会有节奏地开合，而且开合的时间大体上会与客观的昼夜变化保持同步。虽然这种行为并不能完全独立于外部的昼夜循环，但植物在逐渐成熟的过程中，的确会对白天阳光的变幻进行某种记忆，至少在一段时间内如此。在19世纪，植物学家弗朗西斯·达尔文（查尔斯·达尔文的第三个儿子）、威廉·普费弗、朱利叶斯·冯·萨克斯（后两者均为德国人）以及他们的学生和同事都对叶子在白天的活动进行了研究。

在很长的一段时期内，和动物体内的生物钟一样，植物体内的昼夜节律生物钟也被认为是一种非常神秘的现象，但在过去的半个世纪里，以德国植物学家欧文·邦宁为开路先锋的科学家开展了大量的研究实验，现在，人们已经公认植物体内是存在这种昼夜节律生物钟的，而且人们已经能够对这种生物钟的很多“零件”进行独立研究了。和动物一样，植物体内也存在着长短不一的生理周期。举例来说，很多植物体内的近年节律生物钟能够预感到寒冷季节的到来，此时体内的细胞会开始硬化，以应付即将来临的冬季和可能突然造访的霜冻。和雪靴兔类似，植物体内的这种近年节律计时系统实际上是对白天长度的一种反应。该系统依靠一个昼夜节律生物钟测量白天的长度变化。植物体内的这种生理节律

要么是遗传下来的，要么就是在对外部刺激的反应过程中逐渐形成的。即便外部的刺激被人为地消除了，植物体内的这种节律依然会存在或多或少的一段时间，而且这种节律不会随植物周围的温度变化而变化。然而，为了与外部世界的大环境保持同步，植物体内的生物钟也必须依据光线变化提供的线索进行有规律的调整和重置。

在某些情况下，有节律的温度变化也会成为生物钟调整的外部线索，但对大部分的生物钟来说，起作用的外部线索——生理学者把这些刺激称为 zeitgebers（德语，意为“给时者”——译者注）——看起来是光线强度的变化。外部的客观环境必然会对生物体内的计时系统演变发挥关键的作用，这当然没有什么奇怪的，因为我们得以维系生命的昼夜节律就根源于对昼夜更迭的体验。然而，生物钟的调整过程并不一定是一次突然的、不连续的重置。在很多情况下，这种调整过程会在瞬间开始，然后就会逐渐地从一个旧的阶段过渡到一个新的阶段，就像我们对时钟进行调整一样，我们只是在瞬间通过外部介质慢慢地转动时钟的指针，而这并不会改变其固有的转动周期，也就是说，在完成调整的那一刻起，该时钟指针的转动既不会加快，也不会变慢。[2]

令人非常惊奇的是，昼夜节律甚至会存在于最为简单的生物有机体内，比如单细胞的青绿色藻类（藻青菌），这种藻类内生有一个以 24 小时为周期的生物钟，能够与固氮作用和光合作用保持同步。这种生理周期能够及时地把这两种过程分离开来，而这对于藻青菌生理机能的正确发挥至关重要，因为氧气——光合作用的一种产物——的存在会对固氮作用产生干扰。多边膝沟藻是一种单细胞的海生腰鞭毛虫，这种能够发光的海藻大量存在于北美洲西海岸的沿海水域中。生物体的发光是一种化学过程，一个荧光素分子会在荧

光素酶的催化作用下氧化，产生一个新的高能态分子，随后该高能态分子会恢复到基态，同时释放出一个光量子。膝沟藻能够发出两种不同的光：一种是有节奏变幻的稳定而柔和的光，在接近黎明的时候达到最亮；另一种是亮度明显大很多的有节奏的闪光，在接近午夜的时候达到顶峰，不过这需要外部的诱因来引发。另外，膝沟藻体内还存在着其他的生理节律，其中包括一个可以在黎明时分突然阻止细胞分裂的节律，还包括一个能够使其光合能力在固定的时间暂时丧失的节律。如果把膝沟藻长期置于极端暗淡的光线下，其光合作用会稳定但不规律地进行；但在正常的情况下，其白天的光合作用则具有非常明显的周期性，如果持续提供稳定的弱光照射膝沟藻，其所有的生理节律能够在几个星期内都保持不变。如果是在一片漆黑的情况下，膝沟藻的光合作用就会完全停止，其所有的生理节律都会瞬间丧失。不过，短暂的强烈闪光能够让膝沟藻的光合作用恢复正常，从而使其重新获得生理节律，并能保证与此前的节律同步。

这看起来可能有些不可思议，如此简单的生物体，仅仅有一个细胞，却能保有很多独立的昼夜节律和其他的生理节律。事实上，有证据表明单个细胞内的计时器甚至能够左右大而复杂的器官的生理周期，比如人类的心脏，而正是心脏的节律性跳动让我们人类能够在这个星球上繁衍生息。大约40年前，洛杉矶加州大学的艾萨克·哈拉里发明了一种方法，能够把老鼠心脏的细胞进行分离，让它们在营养培养基中独自存活。他通过显微镜对这些细胞进行观察，发现其中某些单独的细胞依然保持着原有的搏动节律，而且完全是在独自进行。最令人惊奇的或许是一些单细胞的细菌，它们每隔16个小时分裂繁殖一次，但却依然能够将与24小时的生

物钟周期几乎完全相同的生理节律信息传递给后代，而且这些节律能够与其分裂繁殖的16小时周期非常协调地发挥作用。在这些有机体内，几乎所有的基因都处于其昼夜节律系统的掌控之中。

对于很多鸟类来说，其昼夜节律似乎是由脑部的松果体控制的，法国哲学家笛卡尔曾认为松果体是人类灵魂的居所。这种具有感光功能的器官能够有节律地产生降黑素，这种激素可以把腺体的活动信号传递到机体的其他部位，即便是在体外的试管环境下也是如此。首先将松果腺组织置于一个光照和黑暗每隔12小时更迭一次的环境中，然后将其转移到一个具有恒定光照的环境，在接下来的几天中，松果腺组织依然会有节律地释放数量不等的降黑素。更有甚者，如果把松果腺组织从一种鸟移植到另一种松果腺已被切除的鸟的体内，后者不仅能够重新获得此前已经消失的昼夜节律，而且其新获取的节律与“捐赠者”的原有节律会保持同步：接受者的行为让其看起来好像生活在捐赠者的时区中。即便是试管中的腺体部分，也会在一定的时间内节律性地继续产生降黑素。

另一方面，对于哺乳动物来说，包括人类，绝大部分（虽然不是全部）生理节律最核心的中枢起搏点是被称为视交叉上核(SCN)的两团神经细胞体，视交叉上核位于视网膜后视交叉上部的下丘脑内。视交叉上核能够完全独立地产生节律，而无须任何外部的光线线索。举例来说，即便把新生的幼鼠置于完全黑暗的环境中，它们也会在生命的第一天展示出非常明显的昼夜节律。然而，在正常情况下，视交叉上核会与其周围的昼夜更迭保持同步，其调整的路径即是直接来自视网膜的视觉影像。事实上，最近人们才发现眼睛里包含有直

接与视交叉上核相连的特殊图像传感器，这些传感器并不用于视觉，所以即便是盲人也可以借助它们调整自己的昼夜节律。[3] 另外，下丘脑还包含有另外一个截然不同的次昼夜节律生物钟——以每小时为周期调整促卵泡激素的分泌。目前已经发现，很多独立的昼夜节律振荡器遍布哺乳动物的全身，以用来调整其行为和生理机能在特定区域的节律。这些计时器仅能在有限的几天时间内保持自身的节律，并需要经常性地接受来自核心生物钟视交叉上核的信号进行必要的调整。[4]

在生物体内发现的生物钟节律到底是来源于生命早期外部的信号刺激还是由遗传基因决定的呢？通过更为细致入微的实验，特别是针对无处不在的果蝇进行的实验，如今该问题已经有了答案。黑腹果蝇有两个互为关联的稳定节律系统，一种用来控制其活动和休息的周期，另一种用来调整其幼虫在一天中破蛹而出的时间。1979 年，R. J. 科诺普卡培养出了根本没有周期性节律系统的变种果蝇以及节奏周期分别为较短的 19 小时和较长的 28 小时的变种果蝇。通过对标准实验室果蝇（“野生型”）的一个特定基因（因此也是变种命名的依据）的变异，对三个变种加以区分。遗传学家还对粗糙脉孢菌进行了研究，该菌类产生孢子的行为是经由一种昼夜节律系统控制的。该菌类的变种呈现出不同的节律周期，如果把不同变种的细胞和野生型的细胞混合，那么混合物的节律周期会因含有突变基因的细胞核的多少相应地发生变化。上述实验表明，一个种群的节律周期长短并不是由特定的遗传基因所决定的。[5]

那么，是什么机制让这些生物钟得以运转的呢？1950 年，俄国化学家鲍里斯·贝洛索夫发现了现在被称为贝洛索夫－恰鲍廷斯基反应（BZ 反应）的振荡化学反应，该反应能够

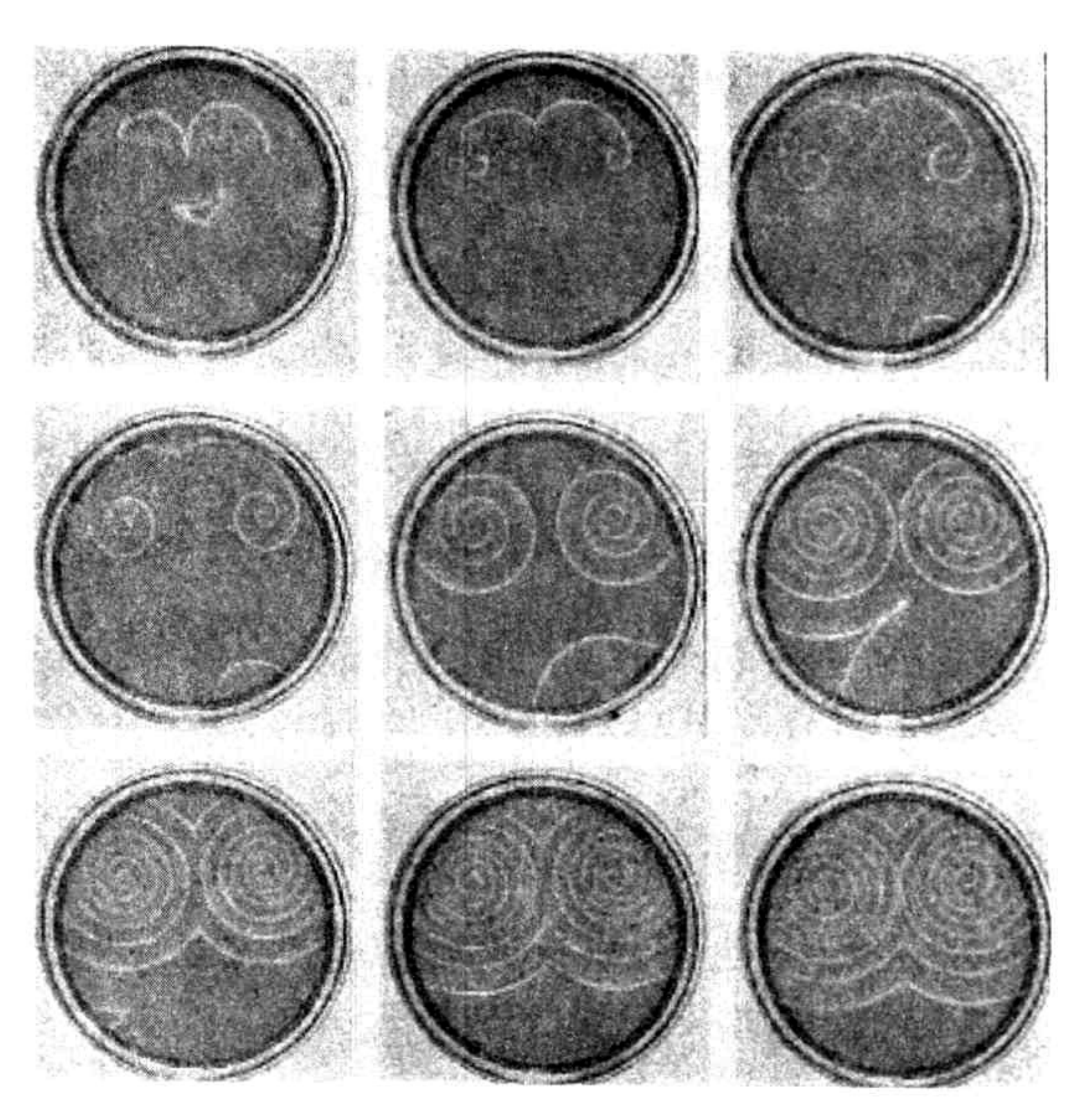


图2 BZ反应图

节律性地产生变化的振荡波，从而把不同颜色的反应产物区分开来（参见图2）。[6] 从那时起，我们就已经知道仅仅依靠化学性质就可以产生节律性的行为。因此，就植物来说，其生物钟机制应该也具备类似的纯生物化学性质。事实上，悬浮发酵酵母细胞的能量代谢实验表明：当定态代谢受到随后添加的发酵基质干扰时，其发酵能量的产生过程——称为糖酵解——就会以几分钟为一个周期开始振荡，随后就可以在无细胞的试管环境下对糖酵解过程中不同周期的振荡进行研究，此时它们除了化学反应就再没有其他激发因素了。

观察到的振荡行为是工程师们所称的反馈机制的典型后果，催化糖酵解过程、将果糖-6-磷酸（F-6-P）转化为果糖二磷酸钠（FDP）的酶本身也是被FDP激活的。因此，当糖酵解开始产生FDP时，催化酶被激活并且开始加速，原始F-6-P的浓度开始不断缩小，并因此抑制FDP的进一步产生并减缓糖酵解过程，这会持续一段较长的时间，直到消耗的

F-6-P 重新得以补充为止。在合适的浓度和代谢速度下，F-6-P 和 FDP 的浓度最终会进入一个节律性变化的过程，两者周期相同，步伐各异，此多彼少，互为消长。（相对于没有时间延迟的情况下迅速进入均衡状态，上述过程中生物化学进程的放缓所造成的时间延迟对于产生节律性的变化是至关重要的。）通过在一个没有任何细胞的系统中选择适当的催化酶、物质浓度和流动速率，生物学家已经可以实现周期为 24 小时的代谢振荡——也就是单纯通过化学性质实现的昼夜节律。同样的反馈机制还被用在果蝇身上产生昼夜节律，唯一不同的是F-6-P和FDP的位置被以下物质取代了：生物节律基因（per gene）产生的效率比（测量蛋白质完全性的指标。——译者注）不同的蛋白质（PER protein）以及其合成的信使核糖核酸，还有其他一些蛋白质。（虽然机制的原理相同，但在藻青菌中产生生物钟的蛋白质和在果蝇体内产生生物钟的蛋白质却大为不同，从这一点我们或许可以总结说：节律系统看起来不太可能是从一个唯一的共同祖先进化而来的。）

此类反馈的结果通常被描述为一个极限环，无论反应是何时发生的，两种反应物数量的对比图最终会越来越趋向于一个相同的闭合曲线（参见图 3）。此时两种物质的浓度开始跳舞，每一个都是按照固定的节律从高往低舞动。

至于是什么机制导致了结构更为复杂繁琐的器官产生周期性的行为，比如视交叉上核，目前的了解还相对有限，这依然是接下来需要研究的一个重要课题。这种节律性是不是神经元突触或神经细胞网络集体作用的产物？还是像植物一样，是单个细胞的计时系统独立作用的结果？有迹象表明答案很可能是后者。在试管中，即便是视交叉上核的单个神经细胞也能够在很多天之内保持其昼夜节律正常发挥作用，当

然了，协同作用也有可能在其中助有一臂之力。就像在前面提到的一样，生物体内同样存在着部分独立作用的昼夜节律系统，这些系统会经常地接受来自视交叉上核的调整信号，至于这些信号机制是如何发挥作用的，目前还不是完全清楚。然而，有一点是可以肯定的：虽然很多生物系统的内生节律行为经常被描述为“振荡性的”，但在其中我们从没有发现实际存在的振荡器，这也是为什么这些生物钟只能大致地而不是完全精确地指示时间的根本原因所在。虽然已经可以做到让这些生物体产生一个非常精准的生物钟，但这样做对生物体并没有什么优势可言。在亘古至今的时光流逝中，这些需要每天调整的生理机制已经能够带来令生物体满意的服务了。

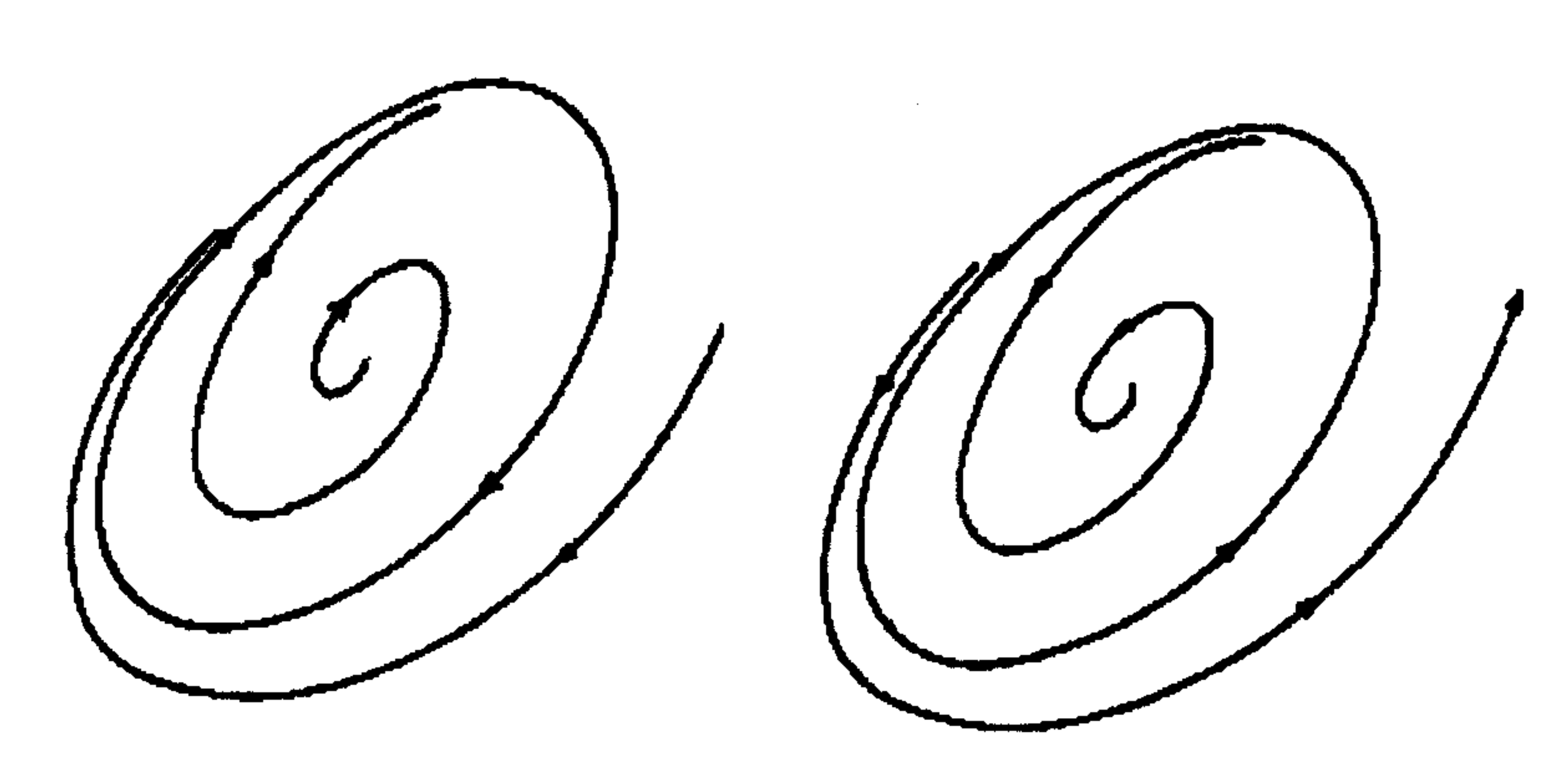
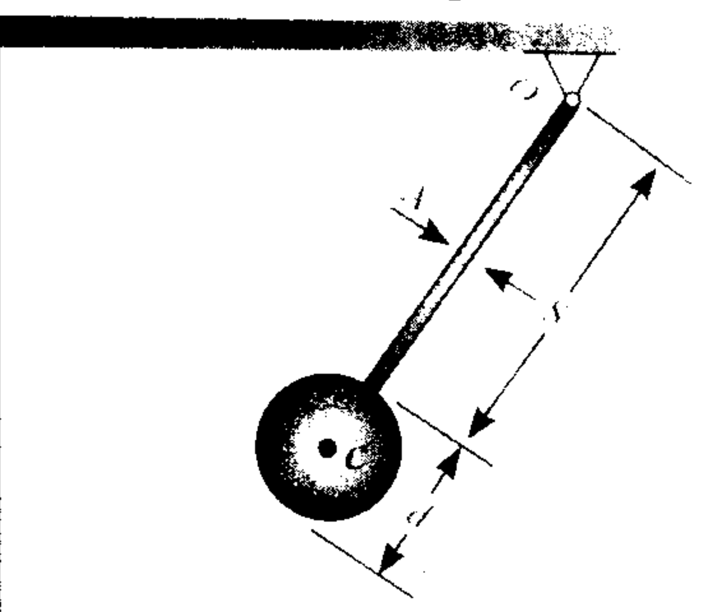


图3　闭合曲线图

在下一章里，我们将离开生物系统，把视觉转向外部的世界，去了解一下人类文明为记录时间流逝所创造的精美设计，回顾一下从日历到装有秒针的手表的演变历程。并不可靠的计时装置伴随着人类走过了数千年的岁月。其后又经过了很长的一段时间，终于出现了新的需求，人们开始期待拥有真正稳定和能够精确测量时间的仪器，随后钟摆作为可靠计时装置的特性被发现了。

第二章



历法：迥异的鼓手

我们不可能知道早期的人类是否意识到了时间流逝的连续性，但看起来事情是这样的：从文明出现的那一天起，这种时间流逝的概念就已经切实存在了。就利用时间的节律性而言，早期的文明有三个很好的理由：为了测量特定过程的持续时间，比如从一个地方到另外一个地方旅行的时间长度；为了计算某些值得纪念的事件发生在多久以前；以及为了对自己的生活和其与周围事物的关系进行排序，并对"现在"和未来的"现在"进行详细的界定。

为了达到第一个目的，最初只要通过简单的对比就足以解决问题了，比如：你的旅程所花的时间将会是从设拉子（Shiraz，伊朗西南部城市，以其出产的地毯和金属制品闻名。——译者注）到伊斯法罕（Isphahan，伊朗中部城市，著名古城，历史上两度被定为伊朗首都。——译者注）旅程的两倍。但随着文明的进一步发展，将一段时间间隔分为相等的几部分变得越来越必要了。当海上的船员或者军营的士兵需要在夜晚轮流值班时，他们当然都希望值班的时间或多或少是一样的。为了达到第二个目的，早期的文明使用的方法也比较简便，只需要记住那些公认会重复出现的事件的次数就可以了，比如：灾难发生在尼罗河水第十次泛滥之前；你的父亲离开之后月亮已经圆了三次了。而第三种需求则回答了类似下面这样的问题：现在是播种玉米或者种植大豆的理想时间吗？而犁地又该在什么时候呢？

对于时间单位"年"的需求最早肯定出现在那些以狩猎和采集为生的人群中。他们需要知道：什么时候应该储存过冬的物品？捕猎野牛或者鹿的最佳季节又是什么？然而，随着农业生产的出现，耕作、播种和收获都必须在正确的时间内进行，因而在那些最早出现农业生产的文明中诞生历法

并不是一件偶然的事情。对于类似季节变迁等神秘知识的需求不断强化，同时那些能够提供此类知识的人也变得越来越强势，越来越充满了神秘色彩。在过去的数千年时间里，太阳、月亮和满天的星斗早就被宗教和迷信思想赋予了莫大的重要性，所以早期的天文学和在其基础上构建的历法都与宗教活动有着密不可分的联系。而祭司等神职人员则是这些神秘知识的守护者和传播者，他们认为这些知识弥足珍贵，并审慎地捍卫着这些资源。建造于大约3,500年前的史前巨石柱就是此类神秘资源之一，它既弥漫着宗教的色彩，又不乏实际的用途。[1]

正如农业生产对于历法的需求极大地提升了祭司等神职人员的权利一样，为了安抚神灵并对他们表达适当的敬意，宗教节日也需要有一个相对规则的时间表，这种宗教需求进一步强化了对于一种井然有序的历法的渴望。那些既任性又反复无常的神灵们的活动毕竟是神秘莫测的，而天体的运动、看起来是其中唯一可预测的规律性活动。因此，占星术发展成了天文学，而天文学又成为了孕育数学的温床。（依据罗马法律，占星术士被称为“数学家”。）

自然界中不需要专家去观察和测量的周期性现象之一就是昼夜的更迭。在最初的时候，白天和黑夜被看作两个独立的时间单位，不过两者最终发展为一个统一的整体，也就是一整天。在一些文化中，黎明预示着一整天的开始，而在另外一些文化中，薄暮被认为是一整天的起点。在人类生活中，比“一整天”更长一些的节律性时间单位是月亮的盈亏循环周期：从一次圆月到下一次圆月持续的时间大概是30天。由于季节更迭的重复性出现，“年”最终成为了人类普遍留意到的第三个节律性时间单位，对“年”的认知无疑促成了

年历的出现。

无可否认，昼夜的更迭和季节的变迁都受到了太阳的制约。前者根源于地球绕地轴进行的自转（先是朝着太阳转，然后是远离太阳），而后者是地球围绕太阳公转的结果。由于地球自转轴与公转轨道平面有一个斜交的倾角，因此，当北半球远离太阳、南半球倾向太阳时，在公转轨道的一边出现的结果就是北半球为冬天、南半球为夏天。而在公转轨道的另一边，就成了北半球是夏天、南半球是冬天。地球围绕太阳公转的周期并不是自转时间与一个整数的乘积：地球公转一周所需的时间为 365.25 天（即 365.25 个自转周期，约等于阴历 12 个月）。要建立一种功能完备的年历可谓困难重重，而所有的复杂性都根源于理顺年、月、日三者之间的关系。

由于 12 个太阴月的周期要比 1 个太阳年短一些，因此就有必要在阴历中加入一些额外的时间，以使其与太阳年的时间长度保持一致。这种加入额外时间的过程被称为"置闰"。在处理这个问题上，不同的文化和文明采取了不同的办法。很多原始的社会群体认为漫长的冬季月份是无用的，并因此对这些月份忽略不计，中部爱斯基摩人（Central Eskimos，生活在加拿大的爱斯基摩人。——译者注）即是其中的一个例子，他们在冬季的时候会经历一个没有阳光的月份，而且该月份的持续时间长短不定，如果冬至这一天恰逢新月期，那么这个月份就会被忽略不计了。

马可·波罗曾记载，公元 13 世纪的元朝蒙古人在所有的重大活动中都会参照一种历书，这种历书据推测应该是学习了汉人的历法体系，而这种体系的历史甚至可以追溯到公元前 3000 年左右。然而，在远古时代，生活在不同地区的中国人都制定了各自不同的历法。公元前 2000 年的夏商

周时代，这种不统一的局面走到了尽头，因为一种官方的历法出现了。在接下来的时间里，每一位帝王都热衷于修订前人制定的历法，以期使其更为完善。在约公元前 370 年后的 2000 年里，各代帝王制定了大约 100 种年历，同时年历的精确性也在不断提高。这些年历不仅有月和日的记载，而且还包括了太阳、月亮和星辰的运动状态。各代帝王是如此地看重这些年历，以至于截止到公元 14 世纪，各朝政府印制的年历已经达到了 300 万份，这些年历被作为官方文件，任何个人都不得私自印制。年历上还包括一些有关“黄道吉日”和“黑道凶日”的信息，告诉人们哪些日子最适合出行、婚嫁、经商，等等。古代的中国人并不以数字纪年，而是给每年一个特定的动物称谓（就连月、日甚至小时也是如此），依次是：鼠、牛、虎、兔、龙、蛇、马、羊、猴、鸡、狗、猪。

人们对苏美尔人历法的详细情况知之甚少，只知道他们依据自己的占星术把每七天归为一个星期。苏美尔人的习俗在很久以前就已经被历史的大潮淹没了，但他们把七天归为一个星期的做法却得以广泛流传，由亚述人传给了犹太人，又经犹太人传给了信仰基督教的人，只是在近代的时候出现了一些比较显著的例外情况。法国大革命之后，为了削弱天主教会的势力，法国的一个委员会在强烈欲望的驱使下提出了一种十进制历法，这个委员会由数学家皮埃尔－西蒙·德·拉普拉斯、约瑟夫－路易斯·拉格兰奇、加斯帕德·蒙热和诗人法布雷·德格兰丁组成。新历法将每个月分为三周，每周十天。这种历法仅仅存在了 13 年。同样出于反对教会的原因，前苏联在 1929 年也提出了一种新历法，每个月由六个星期组成，每个星期为五天——四个工作日加一个休息

日；1932年，他们将其更改为每月五个星期，每个星期六天。到了1940年，这些修订历法的实验才画上了句号。

巴比伦人基于苏美尔人的历法制定了自己的历法。从大约公元前1700年的巴比伦国王汉谟拉比留下的一封信里我们知道，巴比伦人的一年包含354天，共分为大小12个月，大月30天，小月29天，大小月交替出现。不过他们有时会把其中的一个小月变为30天，而且大约每过三年，他们就会额外增加一个整月。然而，在公元前747年纳巴那沙国王统治之前，他们并不依照正常的数字顺序纪年。到了大约公元前500年，他们已经知道19个太阳年与235个太阴月的时间跨度基本上是完全一样的——也就是说每隔19年太阳和月亮在运转周期上就会出现一次重合。这个周期是由古希腊雅典天文学家莫顿访问巴比伦后回到希腊时发现的，所以被称为“莫顿周期”。巴比伦历法的一年为354天，在采用该历法数百年之后，希腊人为每一年指定了一个黄金数，并明确了其在莫顿周期中出现的时间。

相比而言，古埃及文明早在公元前5000年就基于恒星确定了自己的纪年法，特别是昴宿星和天狼星。由于非常靠近太阳这个炽热的发光体，在几个月的时间里用肉眼是看不到天狼星的，只有在伟大的尼罗河——世界上最长的河流——每年开始泛滥的那一天黎明之前，天狼星才会在东方的天空下熠熠闪光。尼罗河每年为期四个月的大泛滥为古埃及人提供了生命繁衍的沃土，而天狼星的出现恰巧与尼罗河开始泛滥的时间重合，这就促使古埃及人以此作为创建历法的基石，古埃及历法的一年由360天组成，均匀地分为12个月，每个月30天（将圆周分为360度的做法无疑根源于这种360天为一年的纪年法）。古埃及人很快就发现360天

的纪年法事实上是存在缺憾的，因此他们把每年更改为 365 天，依然是每年 12 个月，每个月 30 天，不过年终再额外加 5 天作为祭祀日。随后他们又发现即便是 365 天一年的纪年法也并不是十全十美的：每过 4 年，天狼星出现的时间就会延迟一天，不过他们并不认为这种现象是多么不可接受，所以并没有因此改变他们的历法。就像中国人并不依据正常的时间顺序、而是依据朝代更迭纪年一样，古埃及人依据特定的法老统治记录年代的变迁。（从公元前 3 世纪起，希腊人就开始依据奥林匹克运动会纪年，该盛会每隔 4 年或者交替性地每隔 49 和 50 个希腊月份举办一次，第一届奥运会举办于公元前 776 年，但可以肯定的是，该盛会的渊源还要早得多。）然而，具有民用目的的恒星历法的出现可以追溯到公元前 4236 年（也可能是公元前 4241 年）的古埃及，这也是历史上公历纪年的源头。

大流士王将埃及的 365 天纪年法引进了古波斯帝国，一些希腊人也知道了这种纪年法的存在。比如米利都的泰勒斯和希罗多德，他们曾于公元前 6 世纪和公元前 5 世纪到尼罗河沿岸游历，并在那里学习了这种历法。不过古希腊的城邦并没有接受这种历法。在此期间，宗教历法依然在大行其道。犹太历法采用了置闰的方法，以让历法与季节的变迁保持同步，并确保特定的节日，比如逾越节，能够在正确的时间内出现，其结果是他们的每一年都是长短不一的。依据《犹太法典》，每年的长短都由法庭基于特殊的原则确定，方法是观察农作物的生长情况。举例来说，拉比迦玛列二世在公元 100 年颁布的一份官方文件这样写道："我们要让你们知道，羔羊还十分幼小，小鸟也刚刚长翼，玉米收获的时节还没有来到，所以看起来我和我的兄弟们有权利为这一年加上 30

天。”现今的犹太年长度通过一个19年周期进行控制：在第三、第六、第八、第十一、第十四、第十七和第十九年的年末都额外置入一个为期30天的闰月，以19年为一个周期往复循环。与比相反，穆罕默德在《古兰经》里明确规定，禁止任何形式的置闰。对于这种限制的真实目的现在还存在着一定的争议，有人认为这是要彻底消除在早些时候曾在阿拉伯世界存在的一种置闰体系，也有人认为这是因为穆罕默德对置闰的必要性并不了解。无论如何，《古兰经》不仅在过去禁止了这种置闰体系，而且非常明确地抹煞了任何在将来引入该体系的可能性。

另外一种应对太阳周期和太阴周期矛盾的方法来自玛雅人，对于他们来说，时间就是宗教的一部分。他们同时使用太阴月和太阳年，不过对两者完全进行单独记录，而没有引入一种可以将两者合而为一的体系。他们偶尔也会回头去理顺两者之间的关系，其结果就是出现了一种非常精确的——既便不是那么实用——历法。

罗马的第一个历法是由国王罗慕路斯在大约公元前738年制定的，每一年由10个月组成，以春分（春天的开始）的庆典作为一年的开始，以1月24日左右作为一年的结束，加起来总共是304天，一年中额外的61天则忽略不计，这种情况一直持续到下一个国王努马·蓬皮柳斯执政才得以改观，后者提出了一个月运周期，并增加了两个月。由于这种“新”年的长度为355天，所以很快就不能够与季节的变迁保持同步了，只能每隔一年在年末再增加一个月，长度为22天或23天。这种历法使用了大约300年，到了公元前450年，克劳狄（Appius Claudius，公元前4—前3世纪，失明的罗马政治家、法学家、著作家。——译者注）对该历法进行了

改革，将原来的最后一个月菲勃卢姆节之月（Februarius）插入守护神雅努斯之月（Januarius）和战神玛尔斯之月（Martius）之间，然而，这种新的历法并没有向大众公布，而是被祭司们作为秘密保守了起来，祭司们经常对其胡乱篡改，随心所欲地增删天数和月份，最终使得该历法与季节变迁的步伐大相径庭。公元前46年，秩序得以重新建立，凯撒大帝在咨询了希腊籍埃及天文学家索西吉斯后对原有历法进行了改革，发明了我们今天所说的罗马儒略历，也就是公历。新的历法不再是国家秘密，而是向普通大众公开的文件。为了使历法与太阳年保持同步，人们经历了一个包含445天的“混乱之年”，随后凯撒大帝采用了埃及人的做法，以365天为一年。不过他并没有像埃及人那样忽略四年出现一次的一日之差，而是引入了闰年的概念来解决这种误差，所以在正常的年份里，原来的5个30天的月份被6个31天的月份代替了，只有原来的菲勃卢姆节之月是一个例外，改为了29天，而且每隔四年，该月份的天数变为30天。凯撒大帝去世后，闰年的节律又一次遭遇了被胡乱篡改的厄运，并最终与季节变迁的步伐失去了同步性。公元前8年，屋大维再一次对历法进行了改革，使之重回正确的轨道，他还把原来的第六月（Sextilis）改为以自己的名字命名。为了避免偶数所带来的厄运，他从原来的菲勃卢姆节之月抽出一天放到了该月，使之变为31天。改革后的历法依然被称为“儒略历”，该历法成为了现代历法的鼻祖。

有一点凯撒大帝并不知道，另外一个每年1/300天的误差最终也会使得他发明的历法无法与太阳保持同步。事实上太阳年的确切周期应该是365.2422天而非365.25天，随着数百年时间的流逝，儒略历所计算的春分到来的时间会变得

越来越提前。到了公元16世纪的时候，春分到来的时间已经提前到了3月上旬，如果对此不闻不问的话，春分最终就会在圣诞节时早早地光临了。这种细微的误差后来导致了复活节[2]的时间错位，并促使天特大会（Council of Trent，是天主教为处理内部分裂及宗教改革事务，在1545年到1563年间所举行的宗教会议。——译者注）授权罗马教皇再一次修订历法。教皇格雷戈里八世接受了议会的委托，命令将1582年10月4日的下一天定为10月15日，他还要求从1582年起，将每年的1月1日作为新的一年的开端，而不再是儒略历所规定的3月25日。格雷戈里还改变了置闰的规则，在年份不能被400整除的世纪年里，闰年增加的一天要被忽略，也就是说，每经过四个世纪，在其中的三个世纪里每个世纪都有一天要被忽略。因此，公元2000年和公元1600年是闰年，如果没有格雷戈里的改革，公元1900年、1800年和1700年也会是闰年，但现在这三个年份就不再是闰年了，所以也就不需要再增加一天。这样的忽略下一次将会发生在公元2100年。

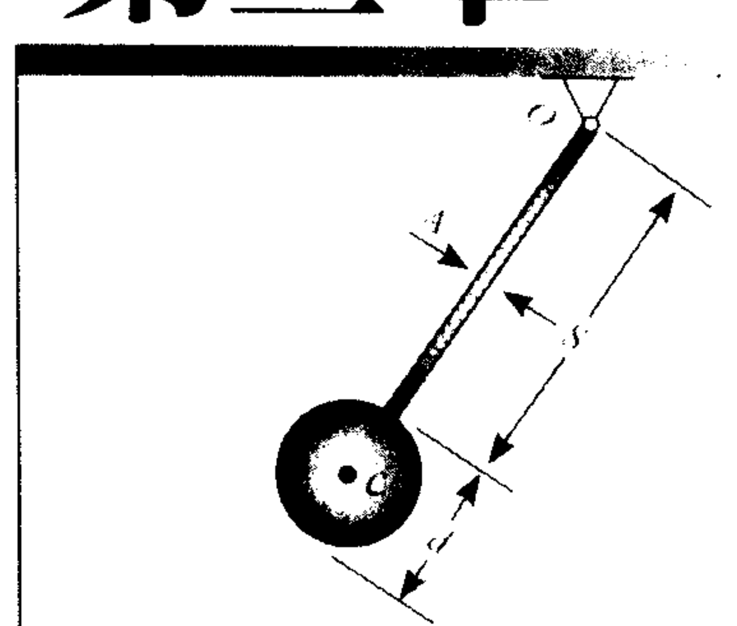
格雷戈里历法在整个基督教世界得到了广泛的应用，除了俄国和英国以及英国的殖民地。英国直到公元1752年才采用了该历法，将9月2日星期三的后一天改为了9月14日星期四。（此时旧的历法所累积的时间误差已经达到一整天了。）本杰明·富兰克林领略了格雷戈里历法令人振奋的一面，他在《穷汉理查年鉴》中写到："我亲爱的读者朋友，请不要因那些被消除的日子而目瞪口呆，也不要报以蔑视的眼光，更不要因丢失了这么多的时间而备感遗憾，把这看作是对自己的安慰吧，你所付出的代价将会是微不足道的，而你的心将会变得更加自由自在。这是一次多么令人神往的放

纵啊！对于那些喜欢舒服地躺在枕头上酣然入梦的人来说，如果在本月的第二天入眠，很可能要到第十四天的清晨才睁开他们蒙眬的睡眼。”乔治·华盛顿虽然依据旧历生于2月11日，现在的人们却要在2月22日为他庆祝诞辰，历法的改革无疑就是原因所在了。

俄国直到1917年才接纳了格雷戈里历法；如果依据新的历法计算，那么十月革命实际发生的时间就会是11月7日了。然而，东正教直到今天依然没有采用格雷戈里历法，他们依然在1月7日庆祝新年的来临，犹太历法也没有改变。而穆斯林的历法依然是严格的太阴历，一年有354天，6个月为30天，另外6个月为29天。结果就是从伊斯兰纪元开始至今，公元纪年与穆斯林纪年之间的时间差距已经超过40年了。

那么，我们现在阅读的是不是历法故事的大结局呢？或者在将来还会有再次调整的必要呢？要知道，格雷戈里历法每年的误差仅仅为26秒，也就是说，需要经过3,323年才会出现一整天的误差。我想这种历法现在已经足够完美了。

第三章



早期的钟表：家庭作坊式的节拍

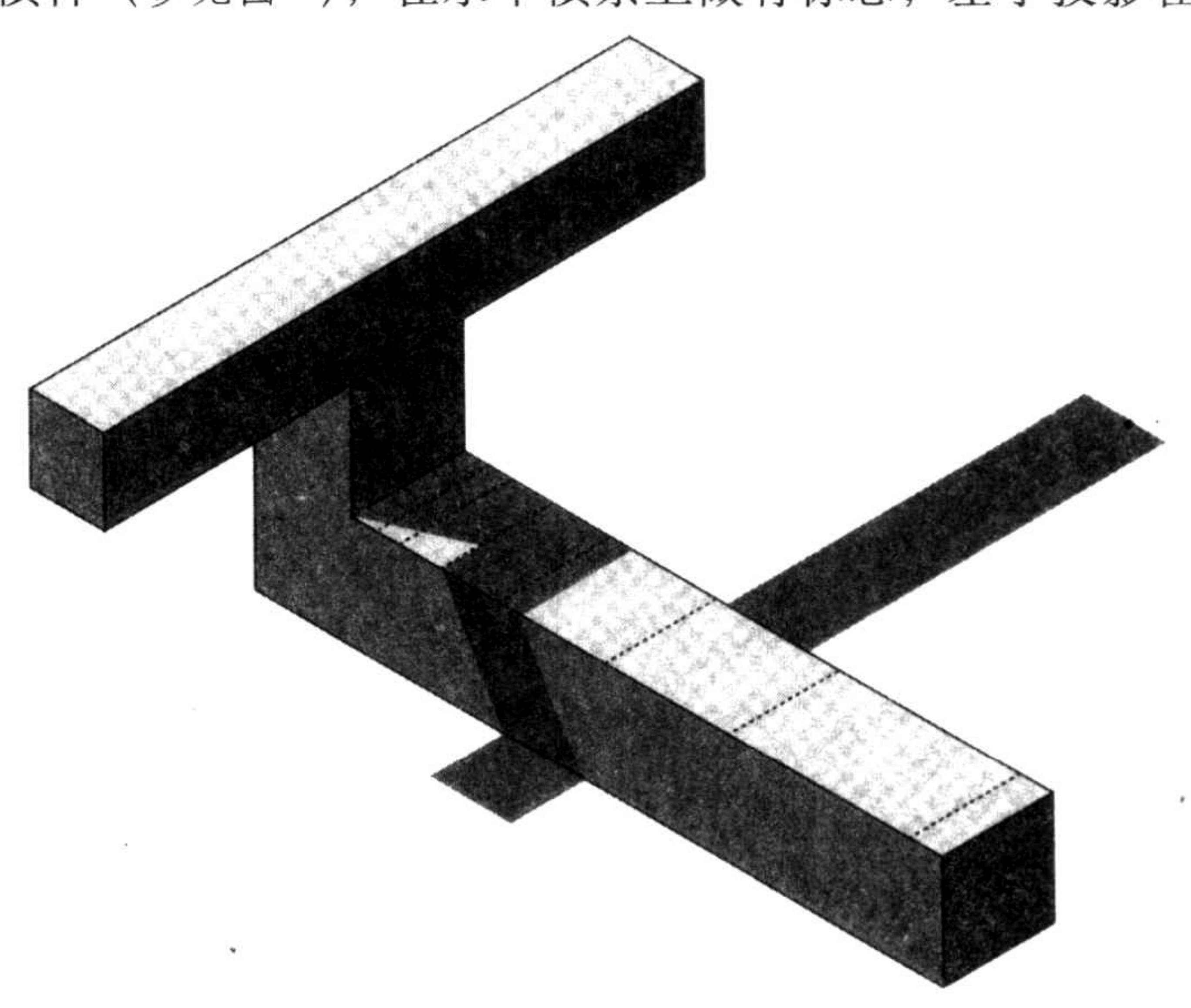
对于不足一天的时间单位，大自然并没有提供一个天然的节拍。萨克逊人曾把一天分为不同的“潮汐”段，在现存的诗歌中还能找到此类证据，比如“早潮”、“午潮”和“晚潮”。在时间单位“小时”从近东（亚洲西南部地区。——译者注）传入之前，无论是古希腊人、古罗马人还是古代的中国人，都从没有使用过比一天还短的计时单位。从宗教或者神职人员的角度来看，日、月、年的更迭都是上天的旨意，是神规定的，因此说，任何更细致的划分都是人为的，因此也是值得质疑的。

闪族人曾经把一整天分为12个时段（每个时段又分为30个小时段），不过具体的划分方法早已失传，早期的巴比伦人在闪族人传统的基础上发展出自己的时间划分方法，他们把白天和黑夜都分为六个时段。但最终把一天24小时的计时方法留给我们的并不是巴比伦人，而是埃及人。从公元前4000年中期开始，他们就已经把白天和黑夜都划分为了12个小时；巴比伦人又对这种划分进行了革新，他们进一步细化了时间的划分，把每小时分为60分钟，又把每分钟分为60秒。公元前500年的罗马人对于时间的概念还仅仅停留在日出和日落上，由一名传报员站在元老院大厅的台阶上宣布日出和日落的到来。直到公元前159年，白天中“小时”的概念才为世人所知。

在开始基督纪元的初期，罗马人把白天分为5个“小时”；公元605年，罗马教皇萨比尼亚努斯又增加了2个小时，并要求教堂的钟声每天敲击7次以记录这一新的计时方式。在长达数百年的时间里，这种白天的7小时计时制在欧洲大陆占据着主导地位。即便是现在，罗马天主教堂和英国圣公会教堂的宗教仪式遵循的还是这种7小时计时制。虽然白天的划分更为细

化了，但在很多地方，黑夜的划分一如既往地分为4个部分，称为“更”或者“钟”。在中东的低纬度地区，将白天和黑夜分为固定时段的方式并不相同，但这并没有导致时间划分单位的过分多样化；然而，在欧洲，这些所谓的“小时”却长短不一，甚至会因为季节的更迭存在着巨大的差异。

在埃及和美索布达米亚地区，白天总能看到太阳，所以最早人们就是通过观测太阳下物体的影子来划分一天的时间的。曾经有三种方法被用来表示一天的时间。第一种方法是在地上笔直地立一根棍子（后来被希腊人称为“指时针”）或者一个高大的标碑，基于棍子或标碑投影的长度表示一天中的不同时间。第二种方法使用的是同样的物体，投影在中午的长度是最短的，依据投影长度与中午时投影的相对方向就可以表示一天中的不同时间。第三种是在地上立一个水平的横杆（参见图4），在水平横条上做有标志，基于投影在横



Ⓐ 图4　埃及的太阳钟。早晨时，将其水平放置，带有交叉横条的一边指向东方；下午时，旋转交叉横条，使其指向西方。

条上的位置来表示一天中的不同时间。在所有用来显示投影长度或者方向的标碑中，最著名的莫过于埃及的方尖塔，最早的方尖塔建于公元前2000年，是埃及人的主神太阳神的象征。方尖塔既可以作为日历使用（通过测量中午时投影的长度），也可以用来记录一天中的不同时间。现存的方尖塔数量非常有限，纽约、伦敦和巴黎各有一个，罗马有几个，或许是作为礼品赠送的，或许是当时的战利品。另外一种基于投影表示时间的方法使用了日晷，日晷在欧洲的使用历史长达数千年。

由于上述的时间测量方法都无法在黑暗中使用，所以必须找到另外一种方法来记录夜晚的时间。在绵延数百年的时间里，埃及人一直通过观星来记录夜晚的时间。在路克索（埃及中部城市，古名底比斯，是古埃及建都次数最多的城市。——译者注）的拉美西斯六世和拉美西斯九世法老的陵墓里，发掘出了星状的时间表，这些表格的历史可以追溯到公元前12世纪。这种表格需要另外一个独立记录时间的方法，这就是水钟，希腊人后来将其称为“水时计”或者“漏壶”（直译为“窃水者”[water-stealer]。——译者注）。这种时钟有一个装饰精美的盛水容器，在容器的底部有一个小孔，水可以通过小孔缓慢地流出容器。在容器的内壁上做有很多标记，通过测量剩余水量的多少来记录流逝的时间长短。据目前所知，最早制造水钟的是生活于公元前16世纪中期的古埃及天文物理学家阿门内姆哈特（他也是目前所知能够留名青史的第一位天文学家）。水时计后来还被罗马元老院用来打断那些喋喋不休的演讲者。水时计可以通过各种方式做成非常精致典雅的样子，因此得以在欧洲使用了三千多年。

当容器内的水位比较低的时候，水流从底部小孔流出的

速度就会变缓，这一事实无疑会影响计时的准确性，水时计的第一次改进就试图校正这一问题。后来的水时计在上部连接了一个蓄水池，蓄水池的水缓慢地滴入一个漏斗形的容器，该容器的水位可以保持一个恒定的高度，超过此高度水就会从旁边的小孔溢出，随后该容器的水会逐渐地匀速流入底部的第三个容器，第三个容器的水位会随之上升，产生的浮力会使得容器内的一个浮子向上移动，借此记录时间的流逝。水时计的第二次改进是阿基米德在公元前250年完成的，他把第三个容器内的浮子连接到一个齿轮传动装置，浮子的移动会转动一个指针，该指针位于一个在我们今天看来算是时钟表盘的平面上（参见图5）。

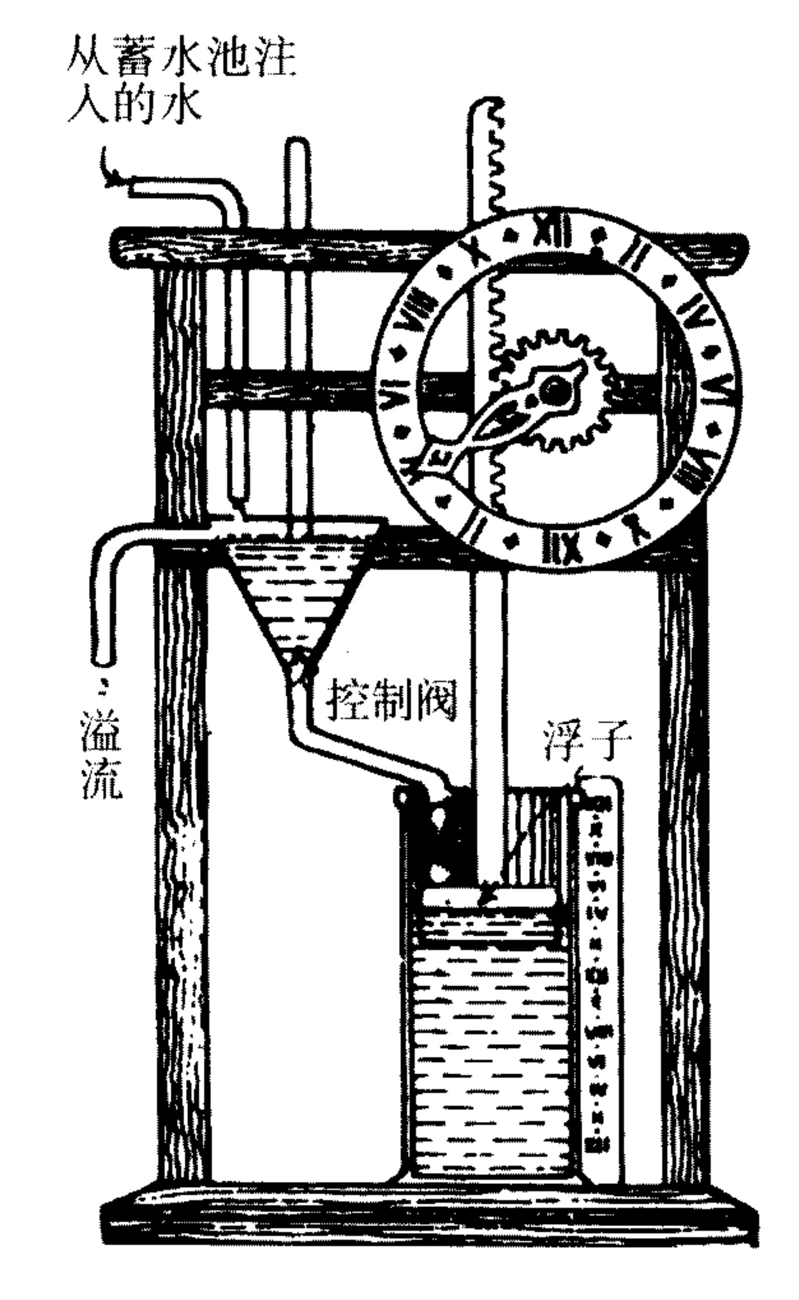
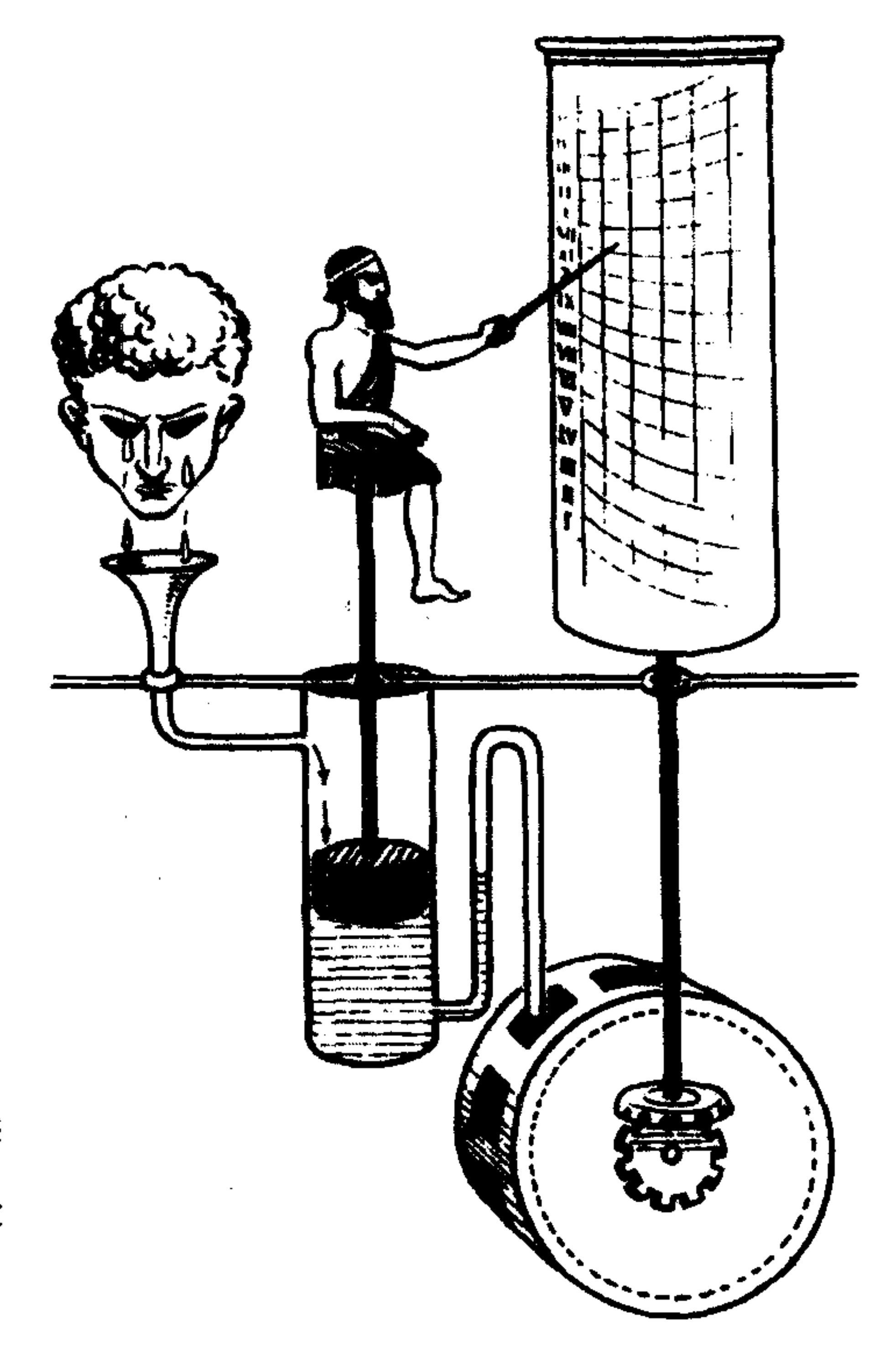


图5 曾在希腊和罗马普遍使用的漏壶

在接下来的几个世纪里，水钟的齿轮装置不断地得以完善，也变得更为复杂，甚至可以依据季节的变化而自动调校每一小时的时间跨度——别忘了，无论是在酷暑还是寒冬，白天和黑夜都包括有12个小时。水钟的变革也体现在了指针上，各种可以移动的装饰性人物造型等被用来增加水钟的吸引力（参见图6）。如果要说这些后期水钟中的精品，最耀眼的明星当属哈伦·阿尔－拉希德赠送给查理曼大帝的水钟了。除了艺术美感上追求精益求精外，该水钟还增加了一个



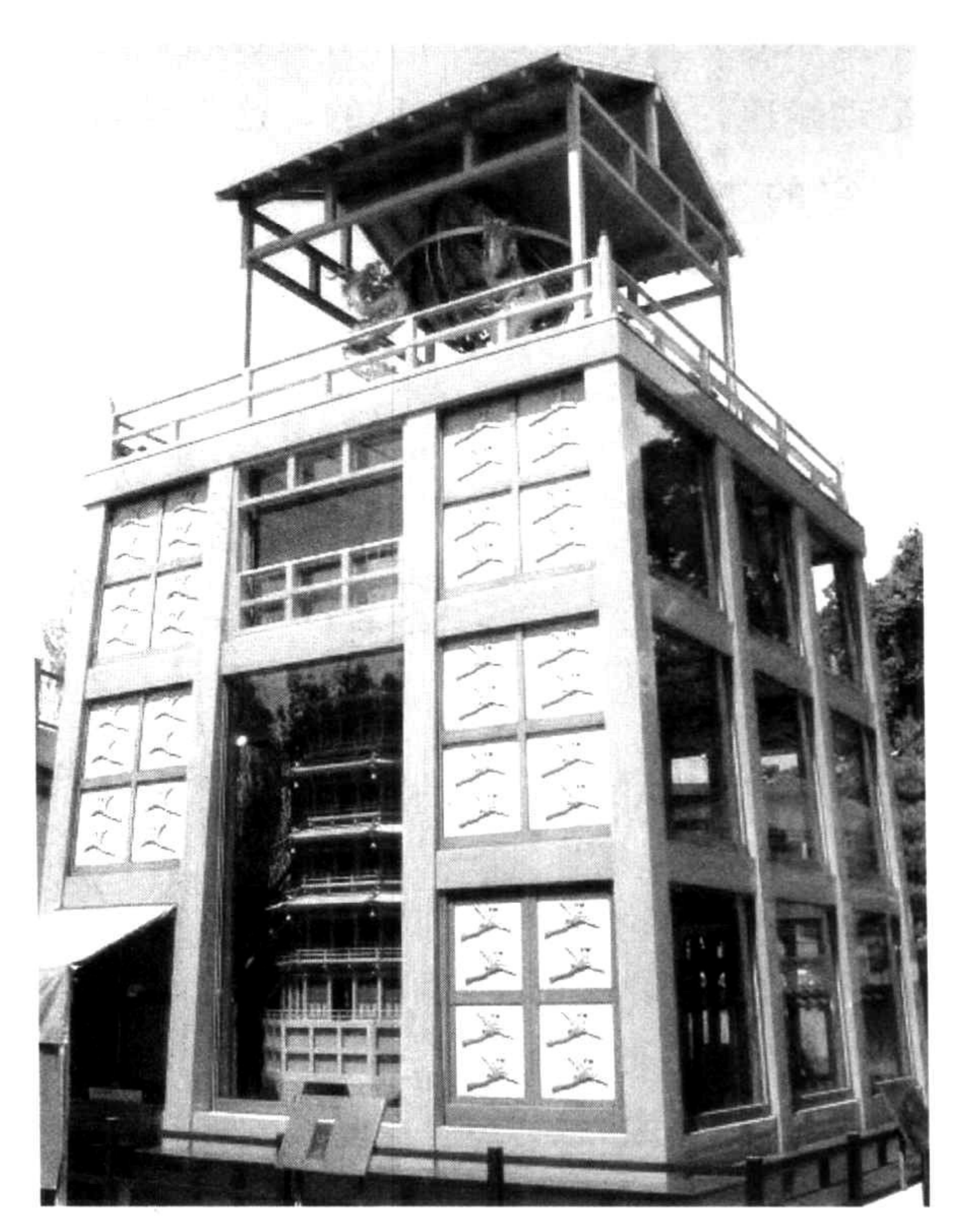
➔ 图 6 希腊发明家斯提西比乌斯于公元前250 年发明的漏壶。水从头部雕像的眼睛流出，右侧人物造型的位置就会提升，从而用一根小棍指向最右侧竖直日历上的时间。虹吸作用既可以让人物每经过24 小时就下降到最底部，也能让水车滚动，从而使日历缓慢旋转，每年都转动 360 度。日历上的标记能够依据季节变化调整时间的长短。

非常重要的新元素——声音。这种声音以恒定速度的水滴声呈现，这无疑是后来机械时钟“滴答”声的前身了。如果声音更大一些，这些滴水声也可以说是后来的市镇传报员或者时钟报时装置的老前辈了。随后，这种滴水声就被自动蜂鸣或报时装置取代了。

水钟有一个至关重要的缺陷：如果气温降到零度以下，水会结冰，水钟也就不能工作了。因此需要一个纯粹的机械装置来记录时间的流逝，特别是在北纬度地区。水钟的基本原理是利用了万有引力影响下水流的恒定流速，13 世纪晚期，水钟的竞争对手——机械时钟——出现了。机械时钟的基本原理也是与万有引力分不开的，它是通过作用于轮轴凹槽内悬挂重物的恒定拉力来实现计时的目的。这种恒定的拉力会

通过一个齿轮组传递给钟面上的指针，或者传递到其他越来越精密的机械装置上来控制钟声或者其他听得到、看得到或者可移动的装置。无论机械时钟多么复杂，其核心都是让中心的轮轴尽可能地匀速转动，而擒纵机构就是为此目的设计的一种灵敏装置。

然而，对于是谁最早发明了这种奇妙的小玩意儿，却依然存在着争议。在很长的一段时间内，人们都将其归功于一位名叫格伯特的法国本笃会僧侣学者，格伯特大约出生于公元 920 年，他对天文学的了解可以说达到了出神入化的地步。格伯特后来成为了教皇西尔维斯特二世。然而，大约在公元 1090 年，古代中国宋朝的大臣苏颂也制造了一个大型的机械



Ⓐ 图 7　水运仪象台复原图

时钟（即下文提到的水运仪象台。——译者注），该时钟的核心元件即是一个集成的擒纵机构装置，被安放在制造于300多年前的时钟的中心部位。

至于古代中国的这项发明技术是否传到了欧洲，我们并不清楚，而且我们也没有证据显示格伯特了解中国的这项发明。我们所知道的一切就是在大约150年的时间间隔里，中国和欧洲分别独立发明了自己的擒纵机构。不过，据更为详尽的史料记载，中国和欧洲的机械时钟有些显著的不同。更何况苏颂发明的水运仪象台说到底是利用水力进行推动，而欧洲的擒纵机构则是利用重力进行驱动（参见图7）。

要想利用自由下落的重物作为匀速运转钟表的驱动装置，就必须克服重力加速度对下落重物的影响，只有持续对下落运动减速，才能达到这一目的，这就是擒纵机构的主要作用。它的主要部件是冠轮和心轴。通过绑在下落重物上的绳索，冠轮被下落重物转动，然后与心轴一边的擒纵叉啮合，使之暂时停止运动，但在重力矩的作用

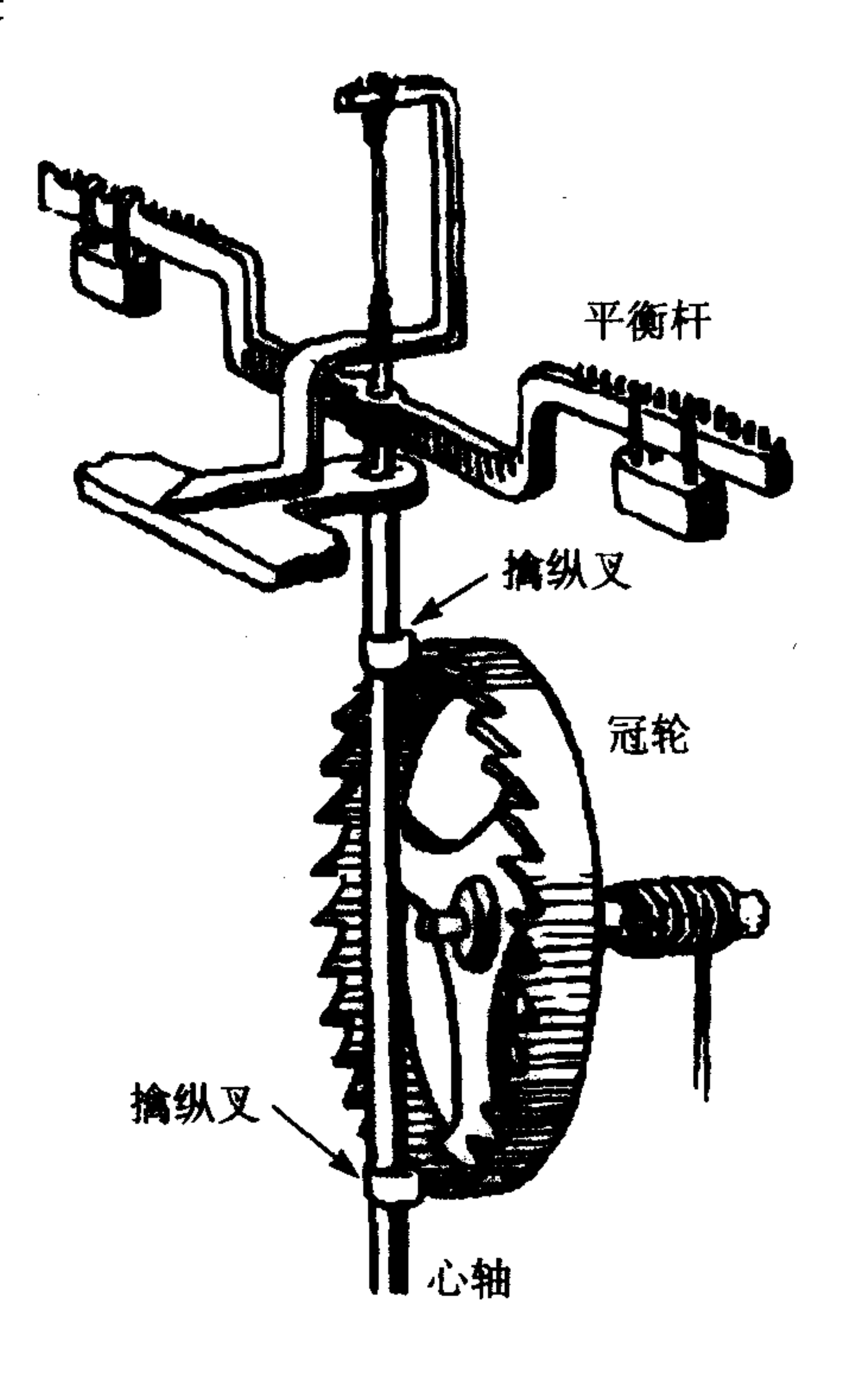


图8 早期的擒纵机构，具有冠轮、心轴和平衡杆。冠轮上非对称状的轮齿使得擒纵叉可以很轻易地滑向轮齿的一侧，从而转动冠轮，随后擒纵叉会再次落下来，与下一个轮齿啮合。

下，冠轮又会开始转动，冠轮齿一边的斜面使擒纵叉得以释放，这样就转动了心轴，随后擒纵叉又与冠轮后面的轮齿啮合，再次停止运动。这个过程周而复始地进行，但是间隔周期相等，防止了冠轮转动加速。和心轴相连的还有一个平衡杆，它可以在水平方向轻微摆动，它是一种保证冠轮平稳转动的惯性附加装置，冠轮转动虽然断断续续，但整体上还是匀速转动，最后要么用来转动表盘指针，要么驱动敲钟或变换数字的装置，或者两者兼而有之。

这些机械时钟是如此巨大，而且制造和维护都需要一笔不菲的费用，所以最初仅在教堂和其他公共建筑物内使用（参见图9）。在位于伦敦西敏寺厅的英国国会大厦里，存放着一个被大本钟取代的机械时钟，该时钟制造于爱德华三世统治时期（其维修记录可以追溯到公元1381年），而法国诺曼底鲁昂市的著名大时钟则制造于公元1389年。当时钟的个头变得足够小的时候，就进入了家用领域，当然也只有那些最为富有的家庭能够买得起时钟。虽然时钟在当时已经成为了财富和权利的象征，但家用时钟的精确度却实在无法恭维：一天之内，这些时钟的走动能够比实际的时间流逝慢上半个小时，甚至更多，因此不得不重新调整时间。

到了17世纪，人们所迫切期望的却不再是时钟的高精确度了。极端华丽的装饰品和时钟驱动的灵巧机械装置成为了人们争相追捧的对象。人们把更多的兴趣放在了魔术般移动的人物造型所带来的娱乐表演上，而不是时钟指示的时间是否准确。基于不同的原理，制造这些花哨卖弄的小玩意儿的工匠们开发出了数不清的技艺，在接下来的几个世纪里，这些技艺都为钟表匠制造更为精确的计时器给予了必

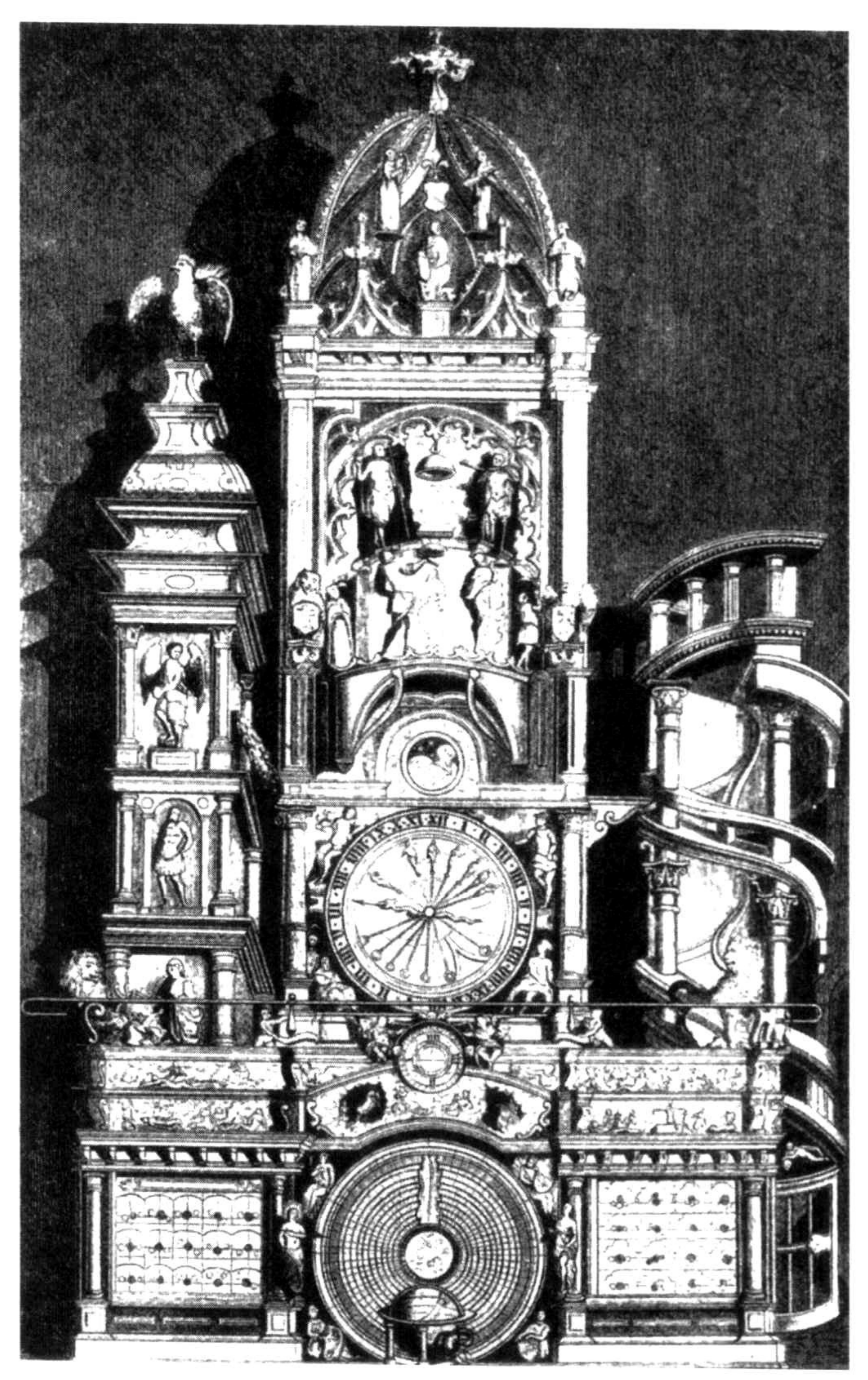


图9 位于斯特拉斯堡的一台著名时钟的刻板画

要的协助。

图 10 呈现的是一个依据详尽的设计图还原的“天象仪”，或者叫天文钟，该时钟是在公元 1348 年和 1362 年之间由意大利极具创意的内科医生和天文学家乔瓦尼·德唐迪设计制造的。布里滕在《古老的钟表和他们的制造者》中是这样描述这个重

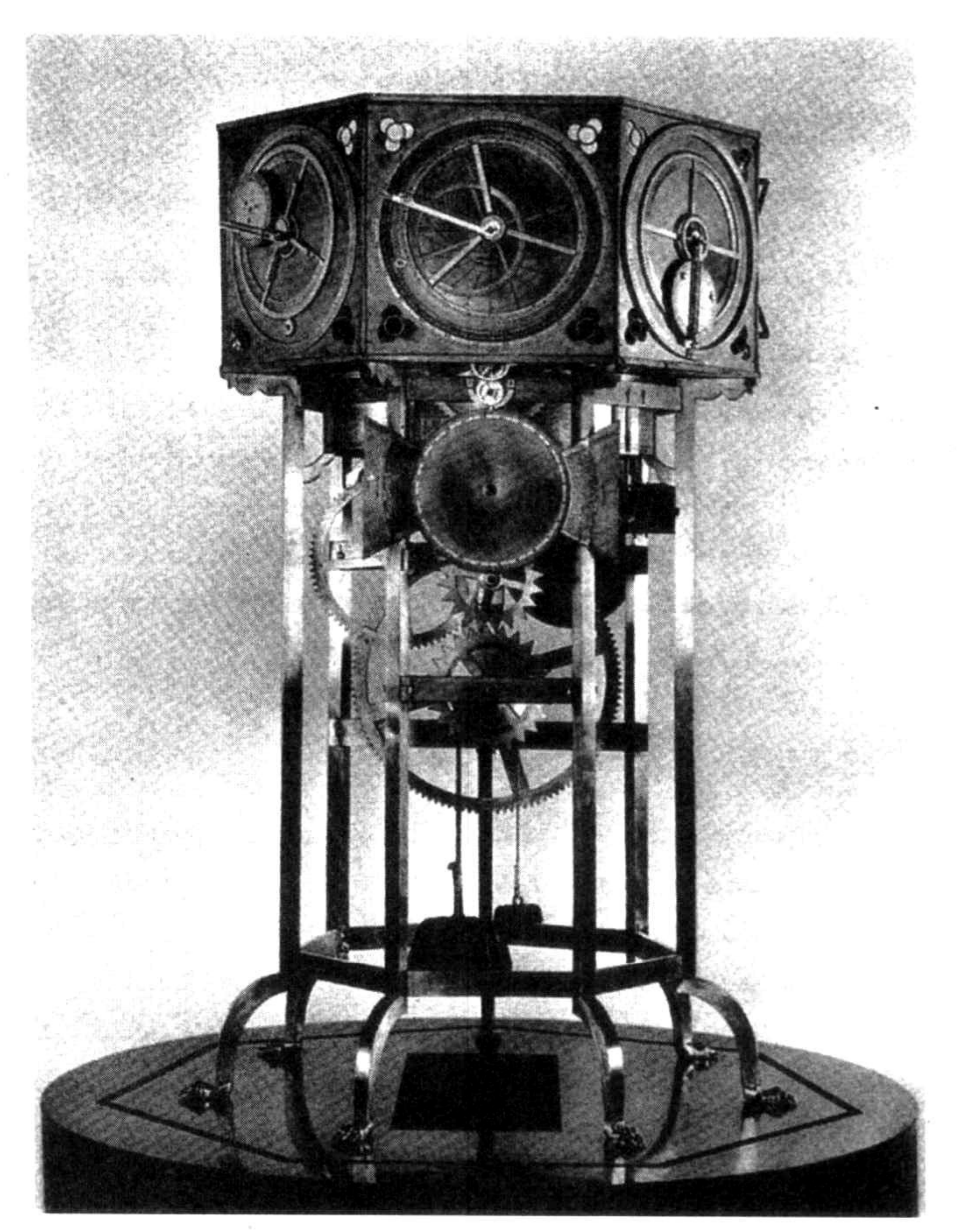


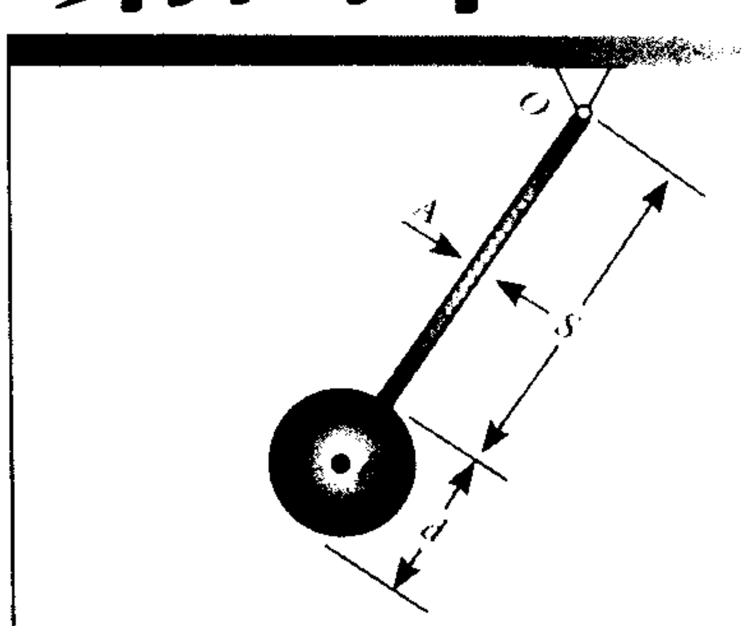
图 10 现代版的德唐迪天文钟，存放于史密森学院。

力驱动的机械时钟的："就复杂程度而言，几乎没有其他时钟可以超越它；在乔瓦尼 · 德唐迪生活的时代，所取得的机械成就可以说微乎其微，而他凭借其内在的悟性，解决了很多的机械问题，这简直就是一个奇迹！"[1] 直到今天，这台天才仪器的很多传动装置依然被作为其他机械装置参照的典范。

虽然关于时间流逝的定义是基于地球围绕地轴的自转和围绕太阳的公转，但任何早期的计时和报时装置都没有利用本质上固有的周期性物理现象。事实是每种装置都利用了一个以均衡的速率发展的进程，而且通过各种方式尽可能地确

保这种速率的确保持着均衡状态：对于水时计来说，就是通过连接附加的容器将水流调节到均衡的速率；对于机械时钟来说，就是增加一个擒纵机构。尽管当时的机械装置发明都可谓创意过人，巧妙非凡，但由于缺少一个周期性的物理过程，所以并没有办法阻止任何此类机械装置的运转偏离太阳的运转周期，因此，就像我们的生物钟一样，这些机械装置也需要循环往复的调校。准确计时对于早期的人类活动来说并没有太大的意义，但随着文艺复兴后科学的飞速发展，对时间进行精确测量就变得非常必要了。然而，在伽利略发现简单钟摆的特性之前，制造真正稳定运转的时钟根本就是不可能的。

第四章



摆钟：大自然的韵律

伽利略全名伽利略·伽利列伊，出生于1564年，比与其同年的威廉·莎士比亚早了两个月。伽利略出生于伟大的文艺复兴时代，并毅然闯入了这场复兴运动的科学大潮中。他的父亲是比萨的一名数学家和音乐家。异乎寻常的哲学思想和善辩好胜的个性让伽利略成为了一个尖酸刻薄的人，他随时准备着与敌人展开激烈的唇枪舌战。在力学领域，当时亚里士多德的理论非常流行，伽利略勇敢地向这个权威提出了挑战，他通过科学实验论证自己的观点，让物体做自由落体运动，或者从斜面上滚下来。这些试验至今仍在学生

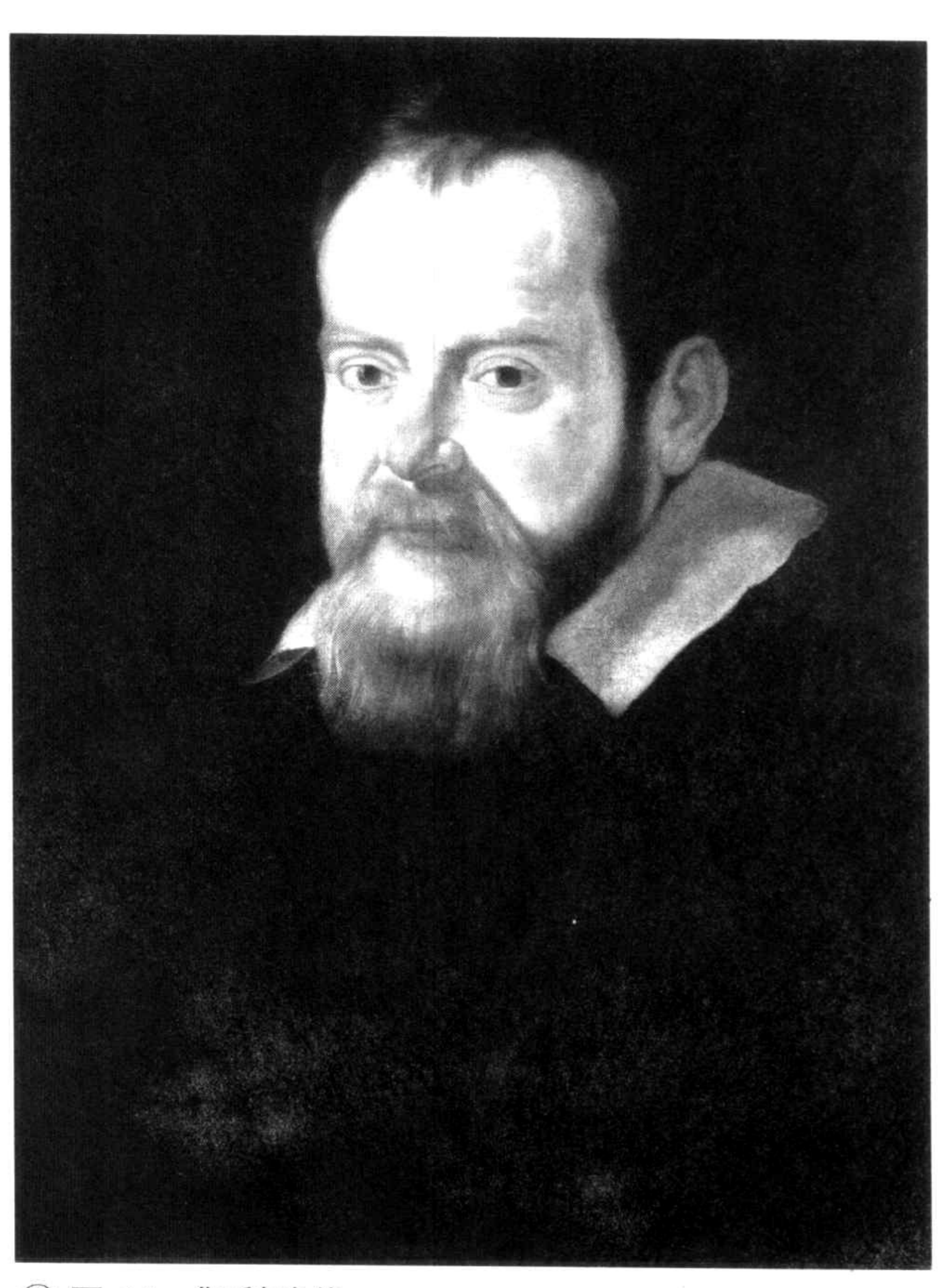


图 11　伽利略像

们的物理课上日复一日地重复着。关于伽利略有一个众所周知的传奇，他把两个重量不同的铁球同时从比萨斜塔上扔下来，以向当时的哲学家们证明：质量不同的物体下降的速度是相同的，从而否定了亚里士多德的观点，不过这个充满传奇色彩的故事可能从来都没有发生过。伽利略在帕多瓦（意大利东北部城市。——译者注）做了17年的数学教授，活跃的他在其间把绝大部分的时间都投入到了对运动的研究中，同时他还进一步阐述和发展了阿基米德的浮力定律，并非常偶然地发明了温度计。(当温度上升时,空气的体积会发生膨胀，该温度计正是基于这个原理发明的，虽然不是很精确，但人们仍然认为它可能是第一个科学测量仪器。）1609年，在荷兰发明了望远镜，这极大地激起了伽利略的兴趣，他很快把目光转向了天文学。他在很短的时间内就为自己制造了一台望远镜——比荷兰的望远镜在功能上有了很大的改善——并成为借助望远镜研究宇宙的第一人。[1] 伽利略有了很多的发现，其中之一就是发现了木星最大的卫星，并详细描述了这些卫星是如何围绕木星这个巨大的行星运动的。伽利略还发表了著名的天文学著作《星际使者》，在整个欧洲引起了巨大轰动，他也因此被任命为图斯察尼大公的首席数学家和哲学家，随后他把自己的科学研究工作地点移到了佛罗伦萨。

与伽利略同时代的约翰尼斯·开普勒提出了行星是沿着椭圆形轨道绕太阳运转的，对此伽利略并不认可，但通过天文学观测，他不得不承认尼古拉·哥白尼提出的日心说是正确的，而哥白尼早在伽利略出生前21年就已经去世了。伽利略开始公开支持日心说，后来教会宣布日心说为异端学说，并于1616年要求伽利略放弃他的观点。在巴尔贝里尼红衣主教成为教皇乌尔班八世后，教会给了伽利略一次机会，允

许他对两种学说——托勒密的地心说和哥白尼的日心说——进行一次不偏不倚的描述,这最终促成了他的另一部著作《关于托勒密和哥白尼两大世界体系的对话》的出版。由于他依据自己的观察来支持哥白尼的学说，这部著作根本就谈不上不偏不倚，而是明显的一边倒，所以在出版后不久就被教会查禁了。1633 年，他作为离经叛道的异教徒（其实真正的罪名是反抗教会）被带到罗马接受宗教裁判所的审判。33 年前，哲学家和天文学家乔达诺 · 布鲁诺就被作为异教徒烧死在了火刑柱上，虽然是基于不同的原因，但那种记忆依然清晰地留在人们的脑海中。为了逃避死刑，伽利略被迫发誓放弃所有与日心说相关的信仰，但有传闻说伽利略在离开现场的时候嘴里还不停地嘟囔着“可它仍然还在运转啊”！伽利略被判处终身监禁，后改为终身软禁。晚年的伽利略双目失明，1642 年逝世时仍处于软禁之中。同一年的晚些时候，艾萨克 · 牛顿诞生，象征着伽利略把现代科学征程的火炬交到了牛顿的手中。(伽利略逝世的时间依照的是格雷戈里历法，而牛顿诞生的时间依照的是当时还在英格兰使用的儒略历。) 1992 年，教皇约翰 · 保罗二世最终公开宣布教会对伽利略在天文学发现上所定的罪名是错误的。

伽利略的第一个重要科学发现就是简单钟摆的特性，理想的钟摆由一个重锤和悬挂重锤的轻质绳索组成：只要重锤的摆动角度不是太大，那么其摆动周期（完成一次往复运动所需的时间）就与单一振动循环（一次往复运动所经弧形的长度）的振幅无关。与在本书前言中引用的传闻不同，伽利略很可能是经由其对音乐的兴趣发现了钟摆的特性，他利用不同长度的钟摆来测试不同的音乐节奏。他第一次把钟摆用作计时装置是在医学上，即用脉拍计测量病

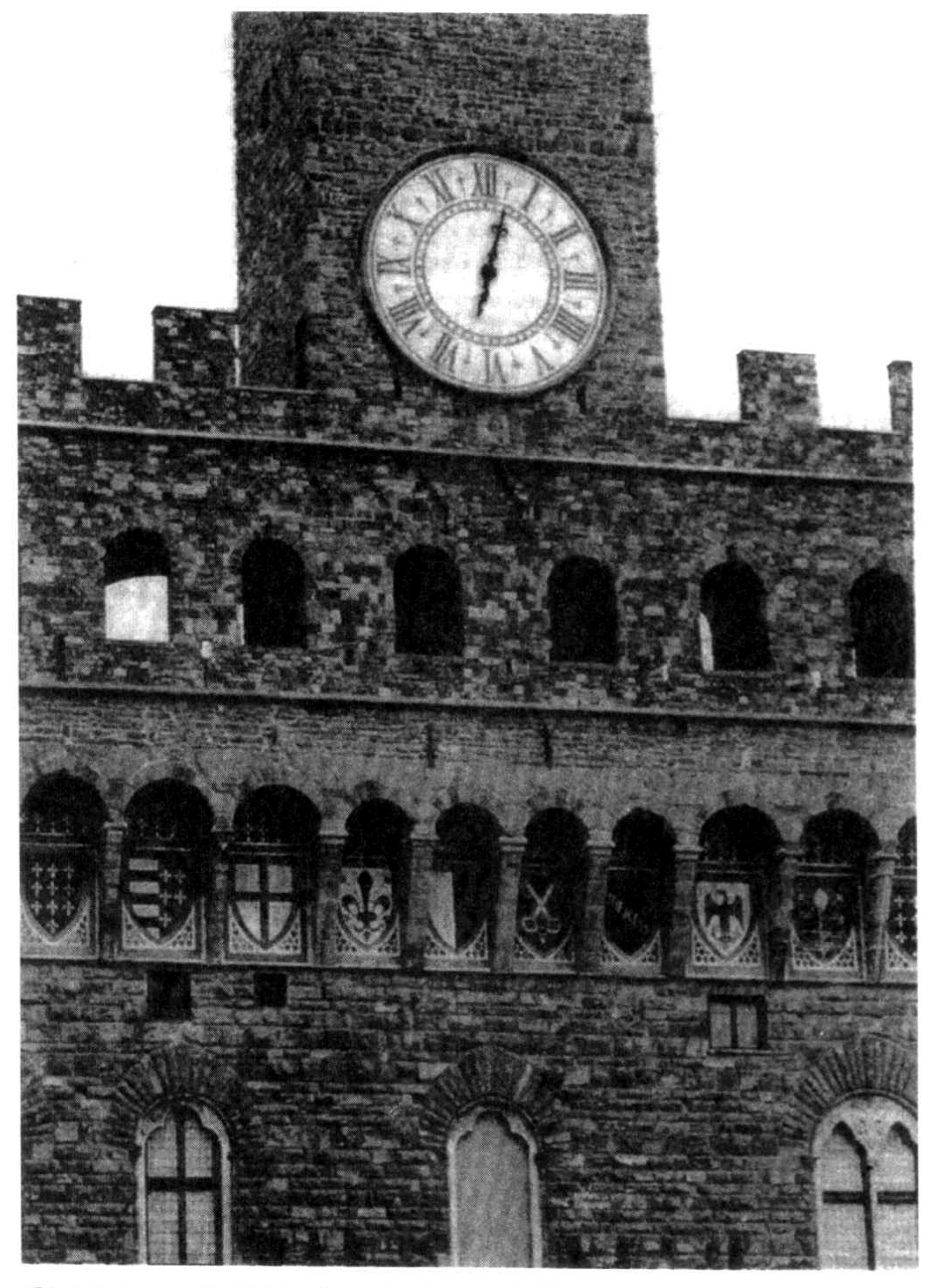
人的脉搏；据说钟摆当时在测量脉搏跳动次数上的应用要远远大于其他方面。

振幅与钟摆的摆动周期无关的特性很是神奇，很多年以后，在与儿子以及其他对时钟制造感兴趣的人谈论这一点的时候，伽利略萌生了一个想法：如果能够有一个适当的擒纵机构，钟摆将可以作为理想的计时器置入时钟的心脏，随后他们也通过实验验证了这种想法的可能性。伽利略本人曾借助一台水钟进行过著名的运动实验；可是直到他生命的晚年，伽利略才借助自己设计的擒纵机构制造出了摆钟，不过该摆钟的详细情况与图 13 所呈现的锚状擒纵机构稍微有一些不同。

伽利略逝世 14 年之后，基于其设计方案的真正时钟才被制造出来，1667 年，费迪南德二世大公命令奥格斯堡的格奥尔格·莱德利依据伽利略这位伟大科学家的设计方案制造了一个钟摆校准器，并把它安装到了佛罗伦萨韦奇奥宫西面塔楼上的巨大单指针时钟里，该宫殿此前曾是梅迪西斯家族的居所。这个大钟现在依然保留在那里，而且走得依然相当准，每周的时间误差不会超过一分钟（参见图 12）。

虽然利用钟摆作为计时装置的想法并没有太多的新意——据说阿拉伯天文学家小伊本·尤尼斯早在 12 世纪就开始这么做了，画家莱昂纳多·达·芬奇也留下了将钟摆用作计时装置的设计草图——但直到伽利略发现了钟摆的最基本特性即固定的摆动周期（等时性）后，钟摆明显适合作为计时装置的特点才开始特别凸现出来。

图 13 大致勾勒出了 1670 年以后的锚状擒纵机构的样子。支撑擒纵轮的轮轴通过悬挂重锤的绳索或者链条驱动，这和早期的时钟没有什么不同（传统时钟的复制品也仍在使用），



Ⓐ 图 12　佛罗伦萨韦奇奥宫塔楼上的巨大单指针时钟

不过到了晚些时候，驱动力就由螺旋弹簧提供了。然而，轮轴旋转的速率并不是通过摆轮心轴和平衡杆进行调节，而是在钟摆上紧密地固定一个锚状支撑，通过支撑上的擒纵叉对旋转速率进行调节。钟摆以恒定的频率自由摆动，并因此确保擒纵轮能够依据预先设定的速度旋转（发出类似滴答滴答的声音）。与此同时，每当擒纵叉与擒纵轮的齿轮进行啮合时，悬重绳索输出到擒纵轮上的扭矩会对固定在锚状支撑上

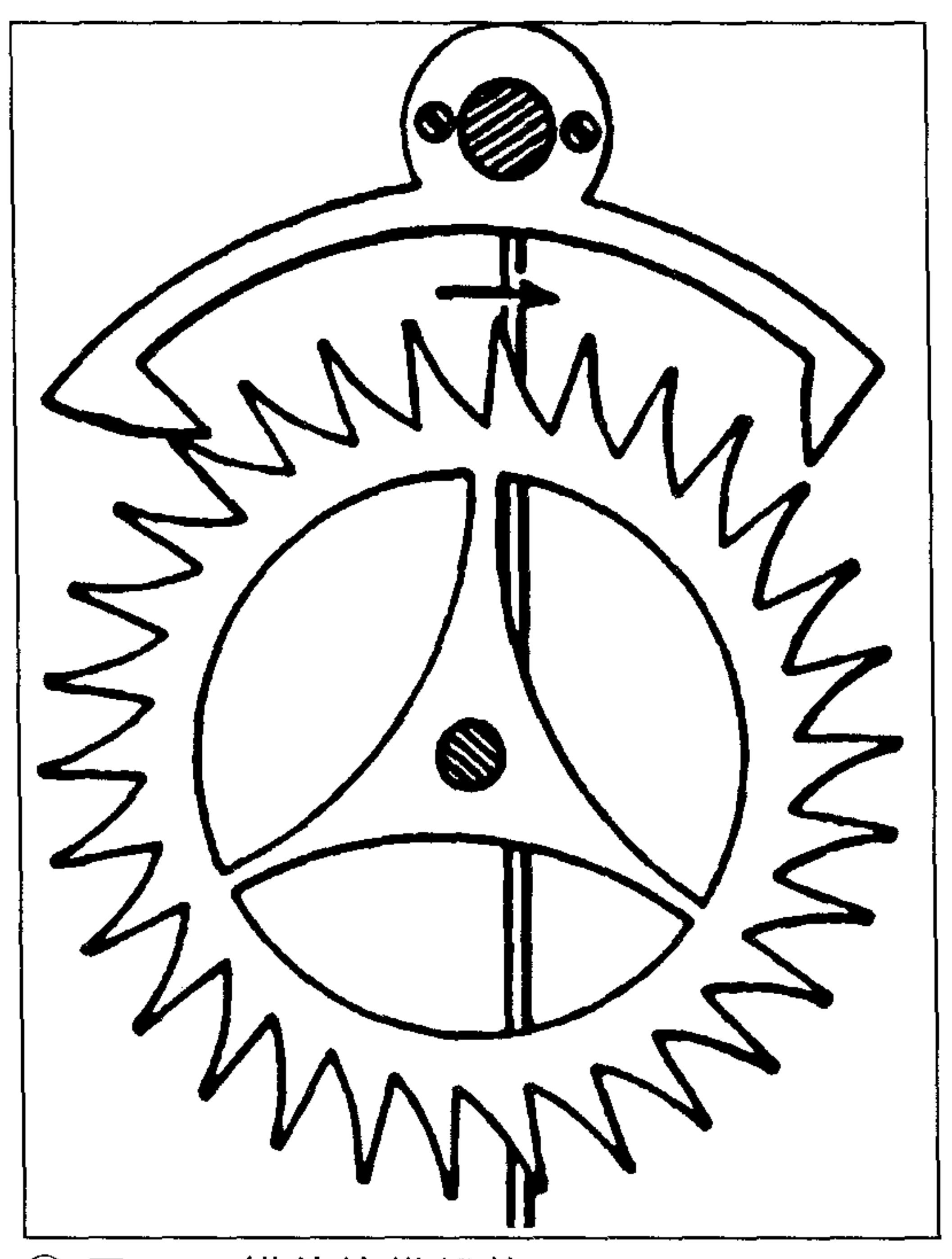


图 13　锚状擒纵机构

的擒纵叉施加一个微小的驱动力，从而使得钟摆不至于因受到摩擦力的影响而逐渐慢下来，直到停止。

荷兰物理学家克里斯蒂安·惠更斯通过实验发现：钟摆的摆动周期与钟摆长度的平方根成正比。如果要使摆动周期加长为原来的两倍，需要将钟摆长度增加为原来的四倍。这样，调整钟摆的摆动周期就变得非常容易了，只需要把悬挂重锤的位置抬高或者降低就可以了。在伽利略逝世的时候，惠更斯只有 13 岁，他的父亲是一名诗人、作家，也是奥兰治王室的一名外交官。惠更斯的家里经常会款待一些文化名人，其中就包括勒内·笛卡尔。在学习了数学和法律后，他一直都幸运地得到了父亲的资助，从而得以在很多年里投身于科学实验和对大自然的研究。他不仅对光的波动性理论做

出了奠基性的贡献，而且还在天文学上建树颇丰，他发现了土星的光环和其最大的一颗卫星——土卫六。

从实用的角度来看，惠更斯对于摆钟发展最重要的贡献在于他的一个创意，这个创意极大地提高了摆钟的精确性和可靠性，以至于有时人们会把发明摆钟的功劳归到他的名下，而不是伽利略。当普通钟摆摆动的振幅过大的时候，其摆动的频率就会多少有些变化，惠更斯设计了一种摆线形的悬架，能够自动对这种频率变化进行校正。其后出现的最好的摆钟都采用了他设计的这种装置。也正是基于这种装置，诞生了第一台能够真正精确计时的机械时钟。机械时钟的振动节拍就像宇宙法则一样，被节律严格的物理运动控制着，而不再需要一而再、再而三的调校，这就使得机械时钟在接下来的数个世纪里具备了极为深远的影响力。如果制作的非常完美，机械时钟完全可以做到自我调谐、异常精确。

落地大摆钟是摆钟的一种，现在被称作“老爷钟”，它曾经普遍出现在当时比较富裕的家庭里，这在今天的我们看来可能会有些可笑。起初人们经常会抱怨这种大摆钟计时不太准确。在早些时候，无论春夏秋冬，人们都会把白天和黑夜均匀地分为等长的时段，而这些新奇的大座钟却采取了不同的做法，他们在漫长的冬夜敲击的钟点要比夏夜多一些！在文艺复兴之前，人们普遍感到并不需要一种能够均匀测量时间流逝的方法。

如果从现代的观点看，可能有人会问：到底是什么界定了一种均匀的时间流逝呢？钟摆的摆动为我们提供了这种定义。在文艺复兴时代，基于科学和实用目的，钟摆的摆动得以广泛应用。我们现在已经清楚，摆钟所定义的时间流逝事实上与引导我们第一次认识到这种节律的时间流逝是有些出

人的，也就是说钟摆的节奏既不同于地球围绕地轴的自转节律，也与我们表面上所看到的太阳绕地球旋转的节律画不上等号。这又是为什么呢？

原因就在于当地球围绕太阳公转时，两次日出之间的时间与地球围绕地轴自转的周期并不完全一样。我们只要做一次思想上的实验，就能够明白地球是如何通过自转影响了白天和黑夜的长短变化。首先让我们假设地球根本就不会旋转；不过，它依然会在某些时间处于太阳的一边，而在半年后处于相对的另一边。结果就是在任何特定的地点，都会是半年为白天、半年为黑夜。要从黑夜更迭到白天，太阳将必须每年升起一次，而要从白天过渡到黑夜，则需要每年落山一次。因此，地球轨道本身就能够对日出和日落的时间造成一定的影响，这与地球围绕地轴的自转无关。另外，一天的长度与地球的自转周期之间的准确差距取决于地球在椭圆形（而不是圆形）轨道上围绕太阳公转时的速度变化。当地球逐渐靠近太阳时，其公转就会处于加速状态，而当地球逐渐远离太阳时，其公转则会处于减速状态（开普勒第二定律能够准确地告诉我们这种速度的差异）。这种变速的公转决定了两次日出之间的时间长度会有所不同，而且日晷仪所界定的时间流逝节律和均匀摆动的钟摆所界定的平均时间节律也会不同。两者之间的关系被称为“时间方程”（参见图 14）。借助该方程，人们就可以在一年中的任何时候把摆钟显示的时间转化为太阳时，也就是假想放置在太阳上的时钟显示的时间；或者反过来把太阳时转化为摆钟时间。

原则上来说，采用日晷仪而不是钟摆的时间流逝节律作为最基础的定义也同样是可行的，不过这将会带来很多不便，而且也是非常不切实际的。如果真这样做了，那么牛顿用以

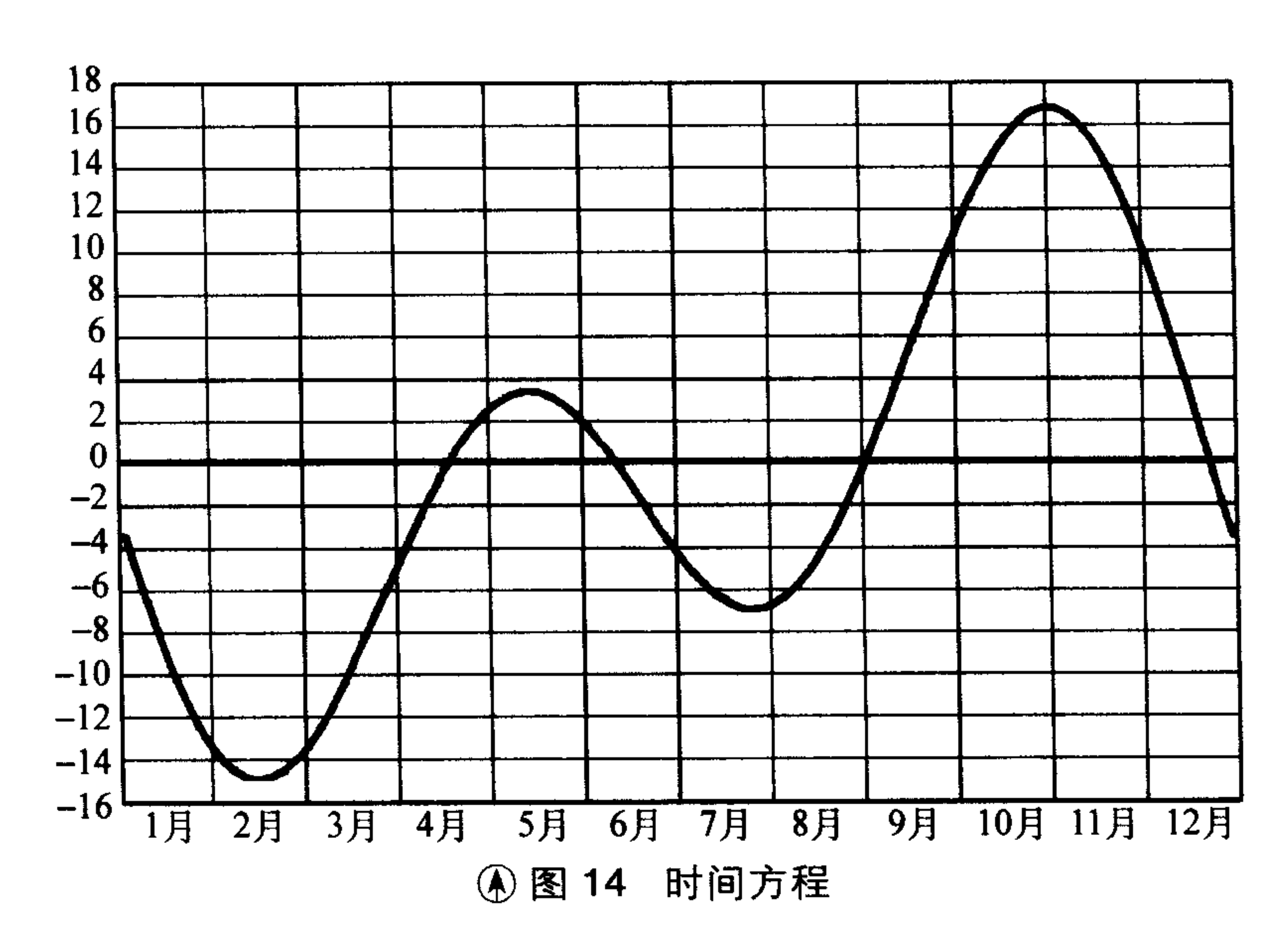


图 14　时间方程

表述其第二运动定律的运动公式就必须做些改动了，依据该定律，一个简单的钟摆会以均匀的速度摆动；物理学的法则也将引出一个随着季节变迁而不同的钟摆周期，这意味着随后的所有物理学发展都将会遇到很大的障碍。（有一个很好的例子可以说明习俗与基础物理定律之间相互依赖的关系：虽然牛顿的运动公式是一种自然定律，其有效性是基于对一种特定时间流逝概念的认可。然而，对于牛顿来说，他却认为时间是上帝赐予我们的。）

文艺复兴标志着真正的环球贸易和远洋航行探险的开端，所以对于精确计时装置的最迫切需求首先出现在航海领域也就不足为奇了。稳定可靠的时钟可以帮助船长在茫茫的大海上确定船只所处的经度。确定船只所处的纬度——也就是处于赤道以南或以北的距离——会相对容易一些，在白天可以借助太阳在一年中给定时间的仰角确定，而在夜晚则可以借助北极星的位置。但是，如果要确定船只距离其在伦敦、马德里或者威尼斯的停泊港以东或者以西的距离，就要困难

得多了。当时最普遍的做法是船位推测法：首先通过指南针测定船只的航行方向，然后不时地把一段圆木从船上丢入水中，通过测量圆木拉在船后的距离，就可以大致估算出船只前进的速度，最后在一张地图上标记船只的航程，并因此得出船只的大致位置。

如果能够在确定纬度的基础上更精确地测量出船只的经度，就可能确定船只的准确位置。1522 年，一种更为精确地测量船只经度的方法出现了。弗兰芒斯物理学家和天文学家杰玛·弗里西斯（原名雷尼耶·艾德尔热斯坦）是第一个提出该方法的人。他认为应该在船只上携带一台稳定的时钟，它可以可靠地记录出发港（或者任何特定经度位置）的时间，而不是借助太阳或者星辰确定当地时间。只要在两地都是太阳当头的正午把船上时钟指示的时间与类似日晷仪等计时装置指示的当地时间相对比，就可以知道地球在此期间已经旋转了 360 度圆周的百分之几，从而算出两地之间的相对经度。举例来说，如果你发现与里斯本（也就是时钟最初设定时间的地点）正午的时间相比，船上时钟所指的正午时间晚了一个小时，那么你肯定位于里斯本以西 15 度，这是因为在这段时间里地球转动的角度为 360 度 / 24 = 15 度。

然而，要想对出发港的时间进行确切的记录，就要求船上的时钟必须非常可靠，而不需要经常性地对其进行校准；无论如何，一再的调整最终会导致难以达到与船只出发港时间保持同步的目的。我们现在知道，迁徙的鸟类需要借助体内的生物钟进行导航，同样的道理，船只也可以借助可靠的时钟确定航向，虽然并不是为了完全相同的理由。鸟类体内的昼夜节律生物钟能够和太阳与星辰一起，帮助它们掌握正确的飞行方向，而船只可以借助指南针和时钟确定航行的方

向，如果再加上太阳或星辰作为参照，就能够确定船只的确切位置。

当伽利略建议使用钟摆对时钟进行调整时，他已经具体地想到了测量大海上船只经度的迫切需要（尽管他也曾建议通过观测他刚刚发现的木星卫星来达到测量经度的目的），而克里斯蒂安·惠更斯在改善摆钟以提高其精确性的时候也想到了这一点。

那么这种装置的可靠性和稳定性到底如何呢？外部微小的干扰是否就能够轻易地给其带来致命一击呢？在改良时钟的过程中，惠更斯有一小段时间卧病在床，在观察安装在同一个木盒子上的两个相同的钟摆时，他注意到了一种奇怪的现象。无论这两个钟摆是如何开始摆动的，不久之后，它们的摆动总是会出现180度的差距——当一个摆向左边的时候，另一个就会摆向右边。情况还不止如此，即使两者的摆动周期有些微的差别，它们最终也会进入同步摆动的状态。（请记住，生物体内的生物钟也会受到该同步效应的支配。）惠更斯在考虑这种共振效应——很明显是通过对两个钟摆都能支持的微小振动发出的（通过实验已经排除了通过空气传播的可能性）——是否有可能被用来制造出包含两个钟摆的、更稳定可靠的时钟，与此同时，皇家科学院的一些人也了解到这种现象，不过他们此时已经对摆钟失去了信心，他们认为通过摆钟来确定海上的经度根本就是不可能的。在他们看来，很显然时钟是一种过于灵敏的仪器，它将很难摆脱哪怕是微小外力的干扰。

无论如何，普通的老爷钟当然解决不了在航海中保持稳定性的问题。海上的船只会处于持续的晃动状态，而且有时候是剧烈的晃动，另外，航行中的温度和湿度都有可能面临

极端的变化，所有这一切都决定了老爷钟不可能可靠地发挥作用。不仅是在海上，就普通的家用目的而言，最迫切的需要就是能把时钟放在一个固定的桌子上，当然如果能轻便地随身携带最好。而要让笨重的大型摆钟变得更为紧凑和便携，就必须对其两个中心元件进行改造：为其提供驱动力的重锤和调节其周期的钟摆。

15 世纪后半期，现在所称的“主发条”出现，摆钟悬挂的重锤被取代了。（有人把主发条的发明归功于纽伦堡的彼得·亨莱因，这一点是否属实还有待商榷。）这种螺旋弹簧是用有弹性的钢条做成的，紧紧地缠绕在一个配有钥匙的鼓形圆桶上；弹簧会随着时间的流逝慢慢地松开，其作用与悬挂在绳索上的重锤完全一样。由于主发条的发明是在钟摆擒纵机构之前，所以要想均匀地计时，装配主发条的时钟还必须配备另外一种机械装置——发条轮。至于该装置的详细情况我们就不必太关心了，因为这种发条轮仅仅使用了很短的一段时间。相比那些靠重锤驱动的时钟而言，早前的主发条驱动时钟当然要紧凑多了，尽管如此，后者的

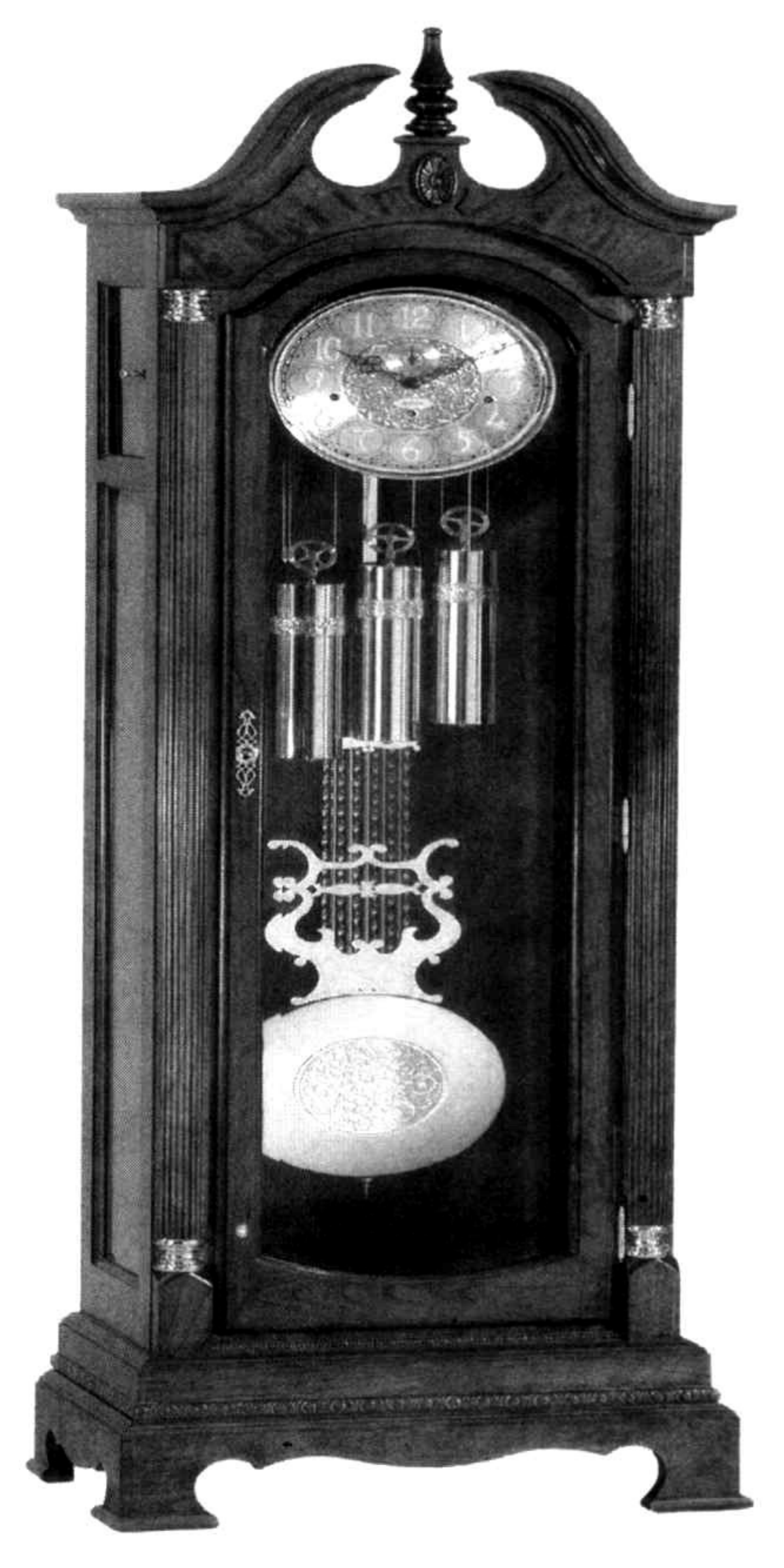



图 15 旧式老爷钟

精确性依然不容乐观，有时一天的时间误差竟然能够达到一个小时，而且当时没有任何办法能够增强其可靠性。在主发条被广泛使用后，重锤驱动的老爷钟还被使用了很长一段时间（在我们家的客厅里就有一个高大的摆钟，我记得父亲每个星期都要去“紧一下发条”，不过并不是通过转动钥匙，而是把重锤往上提一下），而且直到今天还被不停地复制着，特别是那些依然非常流行的布谷鸟钟。

主发条的发明为制造可以随身携带的便携式时钟提供了可能，即便是上下颠倒也没有问题。到了16世纪，这种“钟表”首先在纽伦堡出现了，它们看起来或多或少都是鸡蛋的样子。这些钟表有时会装饰得相当华美，富人们会骄傲地用一条链子把它们挂在脖子上。钟表俨然成了高贵地位的象征。后来加尔文教徒和清教徒认为这种行为过于矫情，而且充满了卖弄的意味，所以他们开始把钟表放在口袋里。从此，怀表出现了，从那时起直到20世纪，怀表流行了数百年。

毫无疑问，这些钟表依然需要校准，而且人们也希望它们能变得更为精致典雅。这些需求在瑞士得到了满足，那里聚集着为数众

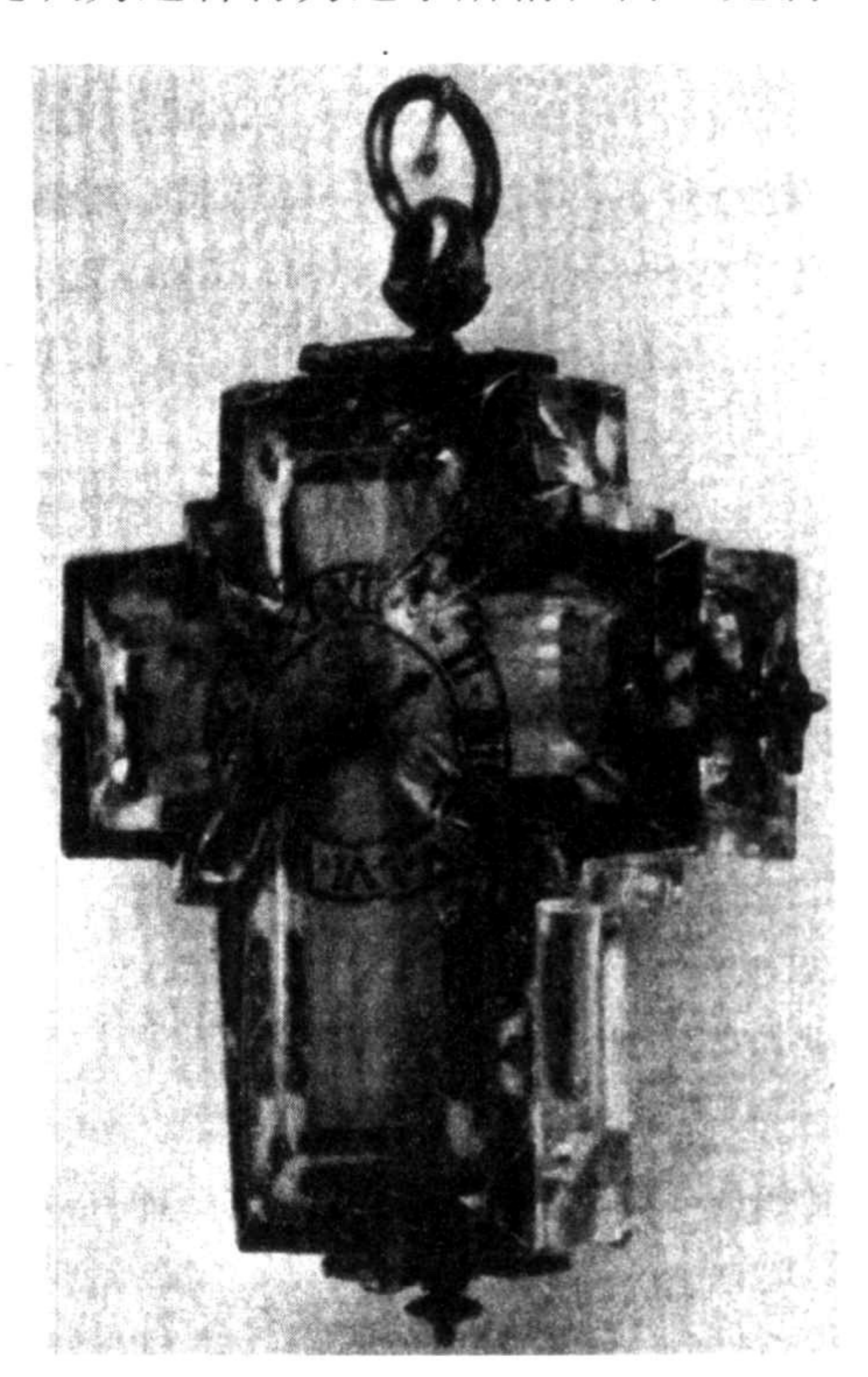
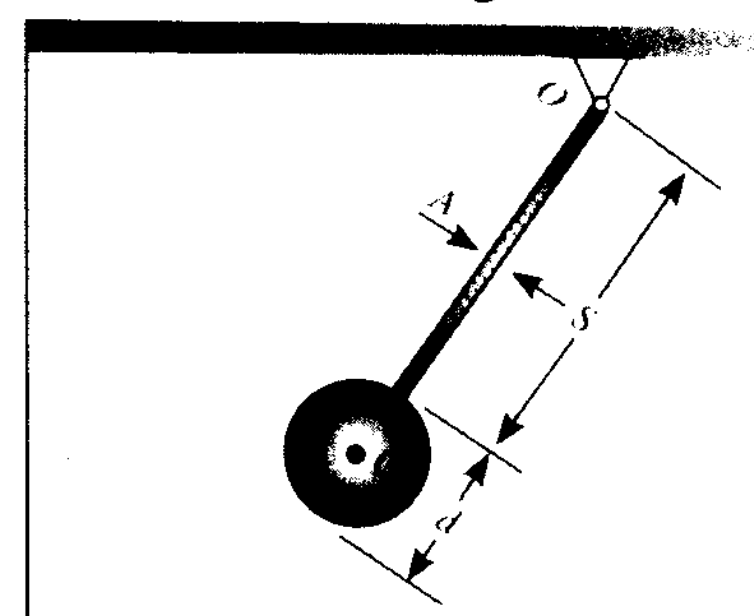


图16　阿贝斯的钟表，17世纪斯特拉斯堡的康拉德·克莱泽制造。

多、技艺高超的钟表匠。加尔文对华丽的服饰非常反感，所以当他成为日内瓦教会的领袖后，就开始禁止生产和穿戴珠宝，结果造成大批的金匠和宝石匠失业，他们开始把注意力转移到钟表的制造上。日内瓦后来成为了著名的“钟表之都”，可以说加尔文间接地为自己的家乡做了一件好事。

1564年加尔文去世后，他所颁布的严格命令开始松懈，当地的工匠们开始把钟表制造技术和珠宝精加工技术进行融合，进而制造出装饰更为奢华的钟表。这些巧夺天工、珠光宝气的钟表成为各国君主和大公们的宠儿，他们在特殊的场合互相赠送钟表以示好感。收到这样的礼物后，他们会让自己的御用钟表匠仔细检查并模仿制造，如果可能，还对其加以改进。很快，钟表的精密制造技术得以在欧洲大陆广泛传播，伦敦成为其中一个主要的中心，但最为活跃的核心地带还是在日内瓦。在整个20世纪里，瑞士钟表依然是精密可靠的时钟的象征。

第五章



后继者：
无所不在的守时性

17世纪下半叶，罗伯特·胡克（我们还将谈到其与牛顿的冲突）和我们的老朋友克里斯蒂安·惠更斯终于发明了一种便携式装置，取代了此前长长的钟摆，就像驱动时钟的重锤一样，后者显得比较笨重，而且只能在垂直状态下发挥作用，不便于移动或随身携带。他们的发明就是盘绕成圆形的摆轮游丝，经改良后，就是今天有时被称为“游丝”的部件，它是一种很细的螺旋形钢丝圈，其伸缩运动能使附在其上面的摆轮作前后摆动。虽然它产生的动力来自于弹簧的弹性而非像钟摆一样是来自地球引力，但是该装置内在的物理学原理与钟摆是相同的：他们都具有在固定频率下振动的属性。这种圆形摆轮游丝的发明可谓是恰逢其时。

1707年10月22日一个雾气弥漫的夜晚，乘坐旗舰“联合”号的海军上将克洛迪斯利·肖维尔爵士和他手下的海军军官在海上迷失了方向，他们未能正确地判断船只所处的位置，误以为自己处于布里塔尼岛的西边，因此就向东北航行欲进入英吉利海峡。结果他们撞到了英格兰康沃尔郡西侧锡利群岛被称为“主教”和“教士”的暗礁。“联合”号以及同行的另外三艘海军最好的军舰全部触礁沉没，2,000多人葬身大海，海军上将本人也未能幸免遇难（不过后来有传言说他被冲到了岸边并活了下来，却不幸遭到了抢劫并被杀害了）。经过那场灾难，皇家海军意识到迫切需要找到一种可靠的方法，以便确定海上船只的精确位置。

七年后，人们对这起事故依然感到难以释怀，很多英国海军上校也屡次请愿，这最终促使国会通过了《经度法案》，该法案许诺，如果有人能够设计出一种方法，使得测量经度的误差不超过半度，则可以获得20,000英镑的奖金（这在当时可是一笔可观的财富）。在赤道附近，一经度的跨度大约

是 60 海里，但该距离会因纬度的不同而变化。因此，在英格兰南部，一个经度的跨度就变成了大约 40 海里，如此说来，法案所要求的精确度——20 海里——并不是难以企及的。法案还设立了一个经度委员会，其成员包括英国皇家学会主席、皇家天文学家、海军大臣、下议院议长以及牛津和剑桥大学的萨维尔、鲁卡苏和普拉闵数学教授。委员会负责在全面评判的基础上颁发大奖，并对那些经济拮据但创意非凡的发明家予以资金支持。多数人赞同的应征提案将会进行航行测试，指定的航线是从英国到西印度群岛。对于那些基于钟表设计的经度测量装置，这意味着在此长途航行中钟表的时间误差不能超过 2 分钟。

到了 18 世纪，对于一经度的距离人们已经有了充分的认识，地球上的海洋和大陆轮廓都大致画进了地图。早在大约 250 年前，哥伦布曾推算从西班牙西海岸到中国东海岸的距离仅为 2,400 海里，而今天我们知道哥伦布可是犯了一个大错误，两地的实际距离大约是其估算值的四倍。有三个方面的原因让哥伦布做出了错误的判断：忽略了两者之间还有一块大陆；对每一经度的距离跨度估计错误；对亚洲的面积估计过大并因而使其东海岸看起来近了很多。哥伦布依据自己的推算，开始了一次探险之旅，并最终歪打正着地发现了美洲。如果知道其所设定的目的地的实际距离，哥伦布可能永远不会开始那次航行。虽然他可能并不是第一个到达西半球的人，但他的"发现"的确帮助地图绘制者绘制出了更为精确的地表示意图。

然而，18 世纪时，依然没有一种稳定的装置能够帮助备受煎熬的海员们确定船只的精确位置，针对此经度测量难题，西班牙国王菲利浦三世甚至悬赏 10,000 达克特（当时流

通于欧洲各国的钱币。——译者注）征集解决方案，荷兰提供了25,000种设计方案，法国国王路易十四则提供了100,000种设计方案。伽利略也给菲利浦国王写信，提出了自己的设计方案，但最终也因不切实际被否定了（同时被否定的还有一大堆千奇百怪的想法）。他设想通过观察木星的卫星来测算时间，并详细描述了木星的运动特点。这种把卫星当成固定时钟指针的想法的确让人眼前一亮，不过在波涛汹涌的大海上，要从船只上观察这个悬挂于天空的表盘可谓困难重重，别说白天看不见，其在夜晚的可见度也完全取决于天公是否作美。

英国的经度奖最终由英格兰约克郡一个木匠的儿子夺得，他的名字叫约翰·哈里森，以制造极具创意的木制钟表著称。在参赛的时候，他已经制造出了每月时间误差不超过一秒钟的钟表，而且在多年的时间里运行良好。当然，这些钟表还没有经受过大海的苛刻考验。哈里森初期的设计给伦敦著名的钟表制造商乔治·格雷厄姆留下了深刻的印象，他给哈里森提出了一些建议并提供了一笔贷款，使其能够继续设计今天被称作H-1的时钟，也就是哈里森参加经度奖大赛的第一个作品。六年后，哈里森做好了向皇家学会展示该时钟的所有准备。时钟装在一个木制的小柜子里，净重75磅，采用全木制齿轮，钟面上有四个圆形的表盘，用雕塑的小天使、葡萄藤和花冠装饰。这简直就是一个美轮美奂的绝佳艺术品。然而，当经度委员会在一个短途的航行中对其进行测试时，该时钟的精确度并没有达到要求。不过，由于它给委员会留下了如此深刻的印象，他们最终决定拨出500英镑给哈里森做进一步的改进，其中一半的资金当场给付，剩余的250英镑则要等到哈里森制造出改良版本后支付。古老的H-1

时钟现在被保存在格林尼治国家海事博物馆，虽然没有了木柜子，但依然能够正常运转。

1741 年，哈里森完成了 H-2 的设计。H-2 的装饰相对含蓄多了，用黄铜制造，盛放在一个小一些的柜子里。虽然它对温度变化和其他海上危险状况有了更强的抵抗力，但却从未接受过正式测试。这其中有两个原因：首先，在向委员会展示的时候，哈里森对自己作品的评判看起来充满了自嘲和批判的味道，这让委员会觉得其实他对 H-2 并不满意，只是想继续得到委员会支持，以便对 H-2 进行更深入的改进，而事实上他也的确得到了这种支持。其次，当时英国和西班牙之间发生了战争，远洋航行变成了一种非常危险的事情，这使得实际测试不太可行。随后，哈里森开始研制 H-3，而这整整用了他 19 年的时间。在这期间，他又从委员会得到了五次资助，每次依然是 500 英镑；他还有幸成为了皇家学会科普利金质奖章的获得者（该奖章后来还被授予了本杰明·富兰克林、欧内斯特·卢瑟福和爱因斯坦）；不仅如此，皇家学会还为他提供了一个职位，不过被他婉言谢绝了。在研制 H-3 的过程中，对于可靠时钟所要求的尺寸大小，哈里森的观点发生了显著的变化，他开始设想能否成功地研制一种可靠的便携式钟表。1759 年，他成功地研制出这种便携式钟表，此时正值七年战争（英国、普鲁士同盟与法国、奥地利、俄国同盟为争夺殖民地和欧洲霸权而进行的战争。——译者注）激战正酣的时期。而当后来海面恢复平静可以进行海上测试时，他已经完成了另一款令他更为满意的时钟，因此 H-3 从来也没有提交给官方进行测试。

最终，哈里森研制出了一款让他感觉有理由自豪和骄傲的时钟，这就是直径只有 5 英寸、净重只有 3 磅的 H-4。这

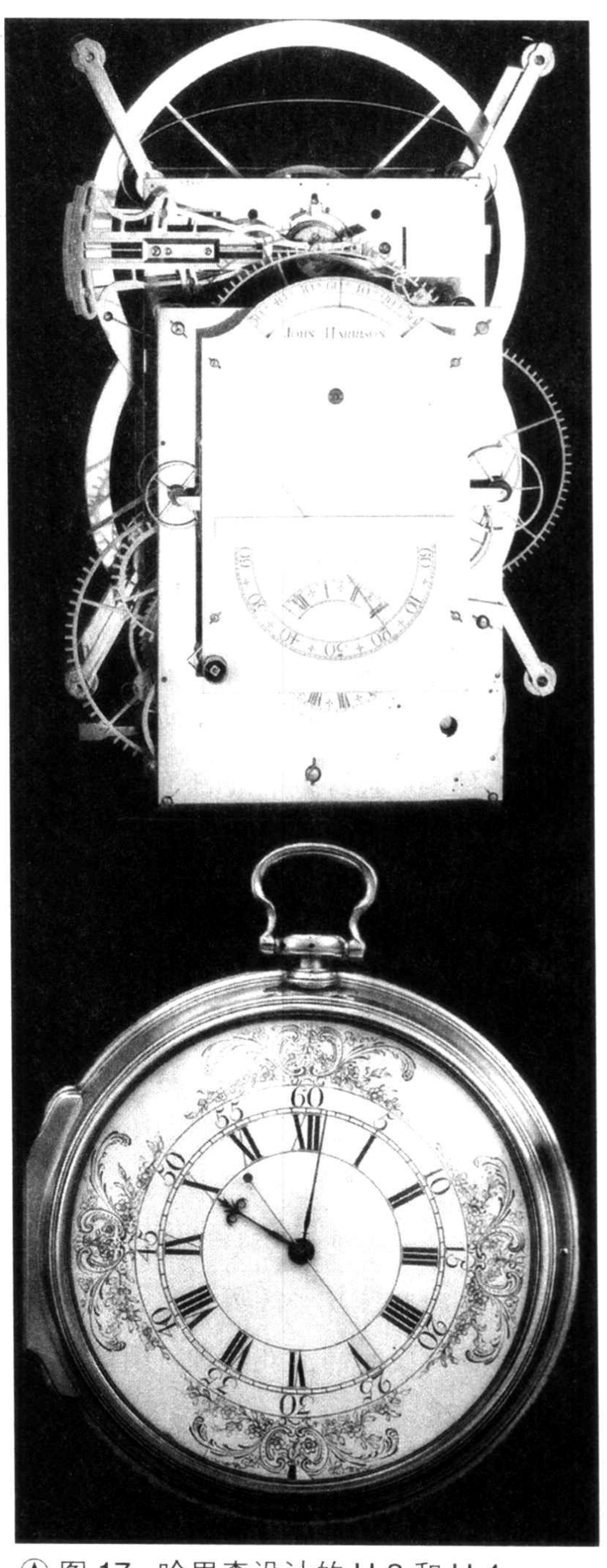


图 17　哈里森设计的 H-3 和 H-4

款时钟处处闪烁着创意的光辉，点缀着绚丽无比的装饰品，举例来说，用钻石和红宝石做成的轴承既可以减少摩擦，也让该钟表显得弥足珍贵。为了测试这个小巧、紧凑的惊世之作，1761 年 11 月 18 日，哈里森的儿子威廉和两名经度委员会的官员乘坐英国皇家海军舰艇“德普特福”号，从朴次茅斯出发，开始了前往位于牙买加的皇家港口罗亚尔港的航行。他们顺利到达了此次远洋航行第一段航程的终点马德拉群岛（位于非洲西海岸的北大西洋内，盛产白葡萄酒。——译者注），船长此前曾依据航位推测法估算该岛的位置，但结果离实际位置还有一段距离，而通过 H-4 计算的位置却非常准确，这让大家备感欣慰，要知道船上的啤酒此时也已经喝完了。经过 81 天的航行后，他们终于到达了罗亚尔港，通过将 H-4 测出的当地经度与天文学上测出的当地经度相对照，得知 H-4 仅仅比实际时间慢了五秒钟。

按理说，约翰·哈里森当时就应获得经度奖的全部奖金，然而，在很长的一段时间里，委员会一再刁难，致使哈里森仅仅得到了其中的一部分。（皇家天文学家自己宣称要竞争该奖，据说他还曾策划阴谋对付哈里森。他测量经度的方法不是用机械钟表，而是利用特制的月角距表。）后来，国王乔治三世亲自干预此事，哈里森也特别向国会进行了一次申述，这样又经过了十年时间，已经 80 岁高龄的哈里森才拿到了奖金的剩余部分。三年后，哈里森与世长辞。

与 H-1、H-2 以及 H-3 相比，H-4 获得经度奖的障碍在于其娇小的尺寸需要定期维护才能保持正常运作，比如上润滑油和定期清理，而且还必须每天用钥匙上发条。（前面三款钟表都经过了精密的工程学设计，所以无需上润滑油或定期清洗。）因此，虽然同属国家海事博物馆的展品，与 H-1、H-2

以及 H-3 不同的是，H-4 并不是作为一个正常运转的时钟展示给观众，而是处于静止状态，可以想象，如果一直处于运转状态，日常的维护早就对其造成严重损害了。

约翰·哈里森设计的钟表无疑是钟表发展史上的一个重要里程碑，后来瑞士的费迪南德·贝尔图和巴黎的皮埃尔·勒鲁瓦对其进行了改进，近代的航海天文钟就是在这些改进版本的基础上设计的——据说航海天文钟的英文单词 *chronometer* 是另一位颇具实力的钟表匠约翰·阿诺德杜撰的。这种航海用的钟表被人们使用了大约 250 年。然而在今天，地球上的任何一点都可以通过具有全球定位系统（GPS）的人造卫星来快速定位，而且误差最多仅为几英尺。全球定位系统虽然不是基于类似航海天文钟的机械振荡器，但它仍然是借助完全同步的时钟来进行定位，三个卫星上各有一台时钟，地球上需要测量的 P 点放置另外一台时钟。通过计算无线电信号从 P 点发射到三颗卫星所需的时间，就可以测定从 P 点到三颗卫星的准确距离，进而通过电脑进行几何运算，通过三角测量法最终确定 P 的位置以及其经度、纬度。要让全球定位系统在地球上任何一个位置都能工作，就需要密布一个由长期定位卫星组成的巨大网络，以确保在地面上的任何位置和至少三颗卫星之间，都能通过发射无线电信号进行直线连接。

近代的机械钟表体积大为缩小，可靠性也得到了大幅度提高，为了确保它能毫不含糊地满足日常情况下的随身携带需求，起码要从两方面对其进行改良。首先是摆轮，要么用两种在周围环境的温度升高时伸展速度不同的金属制造，要么用特殊的合金制造，使其对温度的变化不那么敏感。其次就是对关键部件擒纵机构进行改进（参见图 18）。擒纵机构

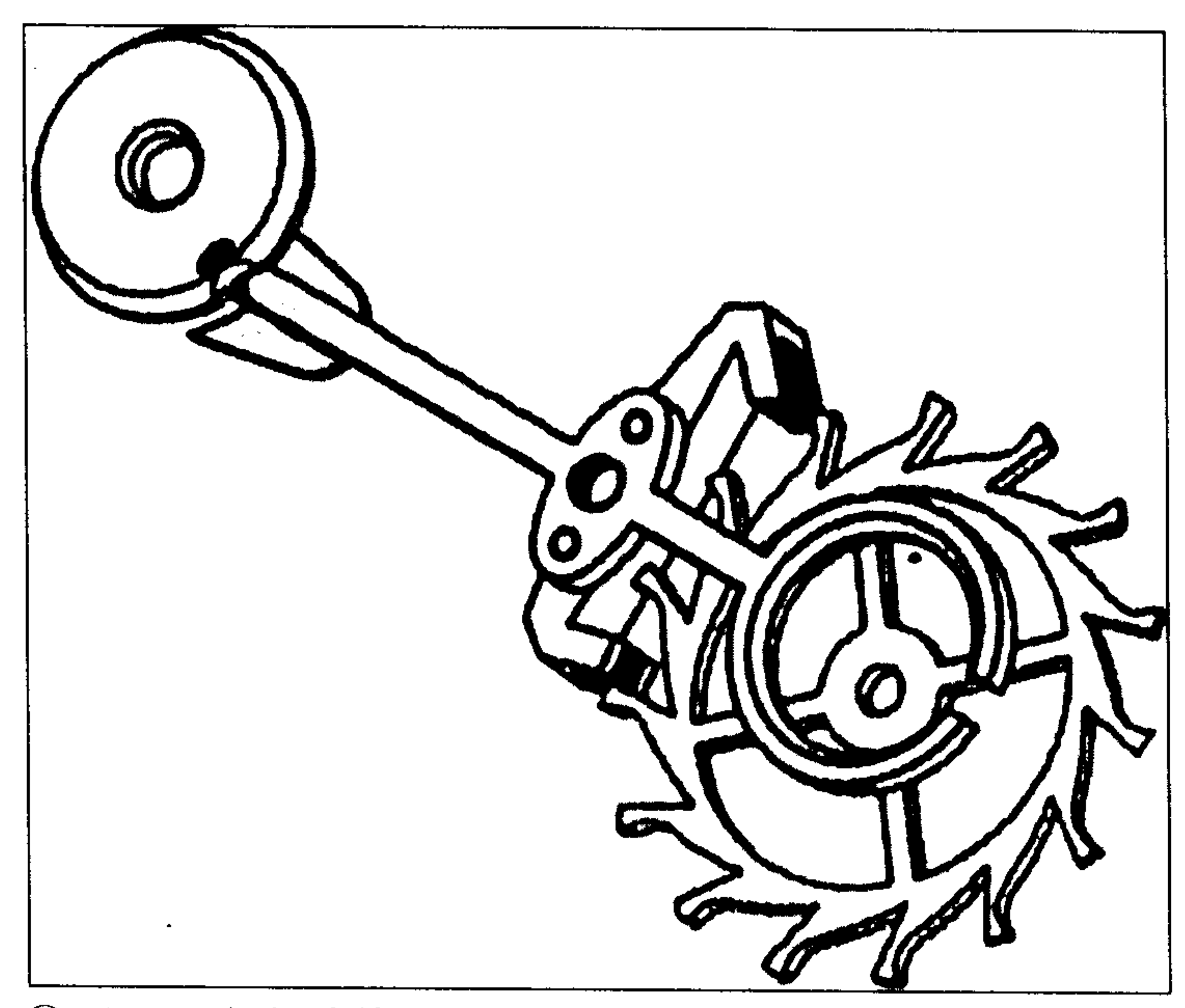


图 18 杠杆式擒纵机构

是钟表机械装置中最精密的部分，也是磨损最大的一个部件，因为它每年都要发出 150,000 次滴答声。这些改进推动了超薄钟表的发展历程。为了减少摩擦和磨损，起主要作用的轴承都由半宝石制成，由此，“宝石”的数量通常被看作衡量手表质量的重要标准。

到了 19 世纪，由于铁路的发展，精确可靠的手表和在公共场所使用的时钟成了不可或缺的物品。早些时候，公共场所和个人对时间的需求主要来自于政府和宗教活动，比如罗马帝国的元老院会议，以及把众人聚集到教堂举办的宗教仪式等。但这些场所都不需要时钟具有高度的精确性。事实上，很多公共场所的时钟甚至都没有分针，佛罗伦萨韦奇奥宫的单指针大钟至今还能证实这一点。通常来说，只有航海和科学工作——尤其是天文学——才会对比一小时还短的时间提出精确度的要求。正是欧洲和美洲的铁路网建设，以及

不同的火车时间表之间的相互依赖关系，使得能够精确到分钟的手表成为了必需品。身穿黑色制服、头戴鸭舌帽的列车长把他那扎眼的怀表举在胸前，命令火车准点发车，一分钟也不能耽误，此场景已经成为了严守时间的象征。如果你不想错过火车，自己也最好有一块可靠的手表。

铁路不仅需要精确的时间，还需要各地有一个统一的时间标准。很显然，根据当地时间（由当地太阳的位置确定）来安排网络密布的铁路时刻表很不方便，必须得有一个普遍认可的统一时间。这个难题多年都未能得到解决，1884 年，在华盛顿特区召开了一次国际会议，指定伦敦附近古老的格林尼治天文台——由国王查理二世创建于 1675 年——作为本初子午线的位置，所有的经度度数都从该位置开始计算。会议还决定采用格林尼治标准时间（GMT）作为全世界海上航行的标准时间，它刚好是格林尼治天文台的平均太阳时间，即根据时间方程修正的太阳时间。这种设定的时间也被称为协调世界时，对于大部分西欧国家都非常适用，这是因为它与这些国家的本地时间相差不大。（事实上，为了方便起见，多数欧洲国家采用的时间比格林尼治标准时间要早一个小时。）然而，在北美大陆，由于东西横贯的距离很长，西海岸太阳落山的时间要比加拿大东海岸晚四个小时（阿拉斯加的西海岸则要晚七个小时），很显然，所有地区采用一个标准时间肯定是不现实的。由于全世界已被划分为 24 个时区，每个时区的跨度为 15 度，因此北美大陆就被分为了八个时区（美国大陆占四个）。在每一个时区，通常普遍认可的当地时间是统一的，因此也能设立统一的火车时刻表。然而，直到 20 世纪中期，还有一批对时区划分持反对意见的人。在美国，印第安纳波利斯的时钟与其南边的布卢明顿(开

车一个小时的距离）的时钟就相差一个小时，布卢明顿的居民如果要去赶火车或者飞机就必须特别留意这两个城市的时差。现在这种现象已经不存在了，全世界几乎都在夏季采用了夏令时——1918 年首次提出，旨在保存珍贵的阳光和节约能源。即便如此，印第安纳州至今仍拒绝采用夏令时，而是全年使用东部标准时间。亚利桑那州和夏威夷州也已经拒绝使用夏令时。

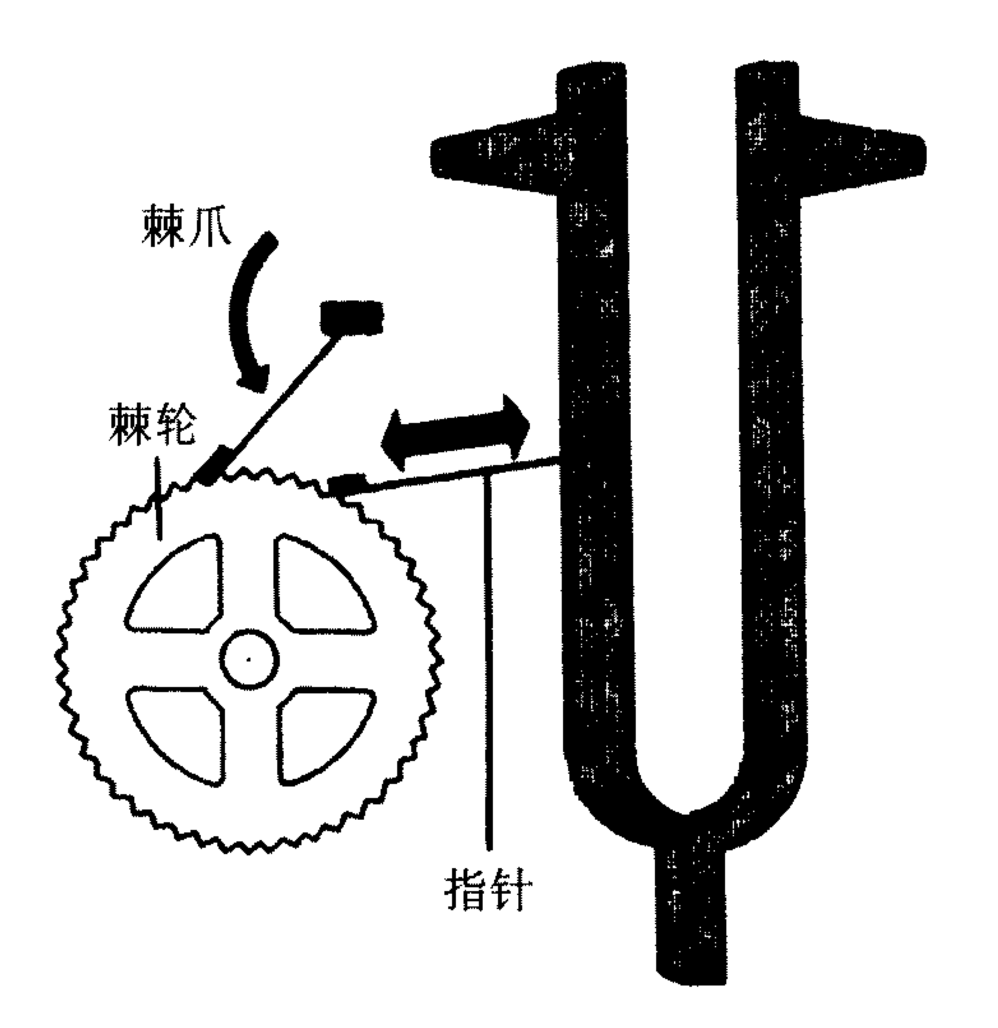
无论是在不同的经度位置存在不同的当地时间，还是划分出不同的时区，都无可避免地带来了国际日期变更线的出现。当阿拉斯加的诺母镇是周二晚上十点的时候，洛杉矶（位于诺母东边 45 度经度距离，因此时间比诺母早三个小时）是周三凌晨一点，纽约是凌晨四点，伦敦是上午十点，莫斯科是中午，北京是晚上七点，俄国勘察加半岛是周三晚上九点。因此，虽然北京和诺母的时钟只相差三个小时，但他们的日历却相差了一天。无论是从洛杉矶飞往北京，还是从伦敦飞往纽约，游客们对手表时间的调整都是一样的，不过如果是前者他们就必须调整手表的日期，而后者就不用。

在从北极到南极的某些经线上，这种日期差别的存在是不可避免的，但这些经线的位置却非常随意。依照国际惯例，这些经线的位置应该或多或少地沿着子午线画，而这些子午线应尽量少地穿过太平洋上有人居住的区域，这样能够将其造成的不便降至最低。然而，对于当地的岛上居民来说，这种划分结果看起来有点儿不可思议。如果你从萨摩亚群岛航行到斐济岛，周一晚上晚些时候出发的话，你将于周三早上早些时候到达，从而将整个周二跳过去了；不过如果你又在周三晚上出发返回萨摩亚群岛的话，到达时将会是周三早上，从而又挽回了失去的一天。

对于其后的科学工作以及诸如飞机旅行等日常活动来说，铁路运输所要求的时钟精确度水平已经不能满足需要了，时钟开始面临一场新的变革。对于近代的时钟和手表来说，最大的变化开始于19世纪中叶，即通过各种形式广泛运用电磁学原理。最初是给钟表增加了一个电动机来承担上发条的任务。对于大型时钟来说，这可是非常耗时的活儿。在安装能够自动上发条的电动机之前，给伦敦的大本钟上发条需要三个人花五个小时才能完成，而且他们每周需要上三次发条，也就是说，每周需要45个工时，一年需要重复此项劳动52次。

对电的更重要的运用是钟表匠开始利用悦耳的音叉振动来准确计时。控制音叉振动的物理原理与弹簧或钟摆的物理原理完全相同。和后两者一样，音叉也有自己的固定频率，但这种频率比任何老爷钟摆锤的频率都要高得多。它一秒钟能够循环振动几百次，并发出能够听得到的嗡嗡声。振动频率的单位是赫兹，是以19世纪下半叶发现无线电波的德国人海因里希·赫兹的名字命名的。钟摆的固定频率大约是1赫兹，而音叉的固定频率在400赫兹左右。音叉的振动可以通过机械方式转换成轮子的旋转，从而通过类似擒纵机构的机械装置使时钟的指针转动起来（参见图19），而通过周期性控制电磁振动可以让音叉持续地发出嗡嗡声。这种精巧的设计在商业上被称为电子手表，是一种非常精确的计时器。

利用石英晶体振荡器甚至还能达到更好的效果。晶体的自然弹性恢复力使晶体受到外来压力后能恢复表面形状，这种弹性恢复力与钢丝弹簧末端以及音叉的振动相似。因此，晶体就像伽利略发现的悬灯单摆、机械表的摆轮游丝以及音叉一样，也有自己的固有振动频率，且同样与振幅无关。不



Ⓐ 图 19　音叉时钟。振动的叉齿将一个小型的弹簧——被称为指针——推向棘轮，棘轮使钟表的指针转动。棘爪可以防止棘轮后移。

同的是晶体的振动频率甚至远远高于音叉，能够达到数百万赫兹。石英是硅石的常见晶体形式，而硅石大量存在于沙丘和沙漠里的沙子中。石英被发现具有压电性，所以特别有用。也就是说，当被压缩时，石英会产生一定的电压，而当被拉伸时则在相反的方向产生电压。

那么，我们假想在一块扁平石英晶体的两头都贴上金属片，并接通外加振动电压。交流电会使晶体伸缩，迫使其产生与外加电场同样频率的振动，“被迫”振动是因为晶体内部有弹性恢复力，以及无处不在的摩擦力。反过来，晶体的压电属性会产生一个相应的振动电场。如果外加电压的交互频率碰巧与晶体的固有频率同步，那么晶体就会摆脱束缚主动振动，产生一个强化外加电压的电场。这种结果就是谐振，由此而生成的就是谐振器。

在时钟里运用石英谐振器的原理与在钟摆上使用擒纵机构的原理类似。就钟摆而言，轮轴因受重力驱使的绳索或主发条的驱动而转动，转动的轮轴产生扭矩，扭矩将微小的振动传给钟摆，从而使钟摆产生摆动，同时钟摆的固有频率能够控制轮轴转动的速率。就石英谐振器而言，外加电压让晶体保持持续振动，振动的石英的固有频率控制所产生的电场的振动。相比机械钟摆而言，石英谐振器有很多突出的优势：可以做得很小而且便于携带；只需要很少的能量驱动；工作时的精确度极高。现在格林尼治天文台放置了一个石英钟，代替了先前的机械时钟，该石英钟的稳定性极高，以至于在任何相邻的两天，其总振动次数的差距不会超过两次，要知道，其每秒的振动次数要达数百万之多。

当然，石英谐振器的电压振动必须被转化为一个看得见的时间指示器。这可以完全通过电子的方式实现，让数字出现在液晶显示器上；或者通过发光二极管实现，再或者让其产生的电压驱动一个与交流电压同步运转的小型电动机，从而使表盘上的指针转动起来。通过这种方式制造的时钟通常价格便宜、经久耐用，而且精确度非常高。另外，还可以制作出两个完全同步的时钟，全球定位系统所需的就是这样的同步时钟。

虽然压电晶体的天然振动是一种非常精确而且相对可靠的时间测量方式，然而如果时间长了，它们的可靠性就会大打折扣。随着存放时间的延长，晶体振动的次数会相应减少，而这会造成钟表走时不准。然而，原子释放的光的颜色——也就是组成光的电磁波频率——却完全是固定不变的。这就是原子钟所蕴含的原理。下文描述的即是此类装置的一种工作模式。

铯（类似“钠”）原子由一个中心原子核和包含在周围的有133个电子的电子云组成。每个电子都可以看成一个小磁铁（由于电子带有负电荷，又在不停地运动，这种运动会产生变化的电场，从而产生磁场。——译者注），在外界电磁场的作用下，最外层的电子磁场极性会发生反转（电子分布在围绕原子核不同的轨道之中，不同轨道的能量是不一样的，外层电子受原子核作用力最弱，最容易在外界作用下发生状态变化。——译者注），原子会增加一定量的能量；但很快磁场又会恢复从前的极性，多余的能量会被原子以电磁波形式发射出去，而发射出去的电磁波频率为精确的9,192.631770兆赫，在无线电频率范围之内（因为在无线电频谱范围内的电磁波是工程师可以制造的电磁波频率范围，这就为下文中提到的利用无线电磁波同步频率提供了可能。——译者注）。要想反转电子磁场的极性，首先要有相同频率的电磁波。如果让一束无线电磁波通过装满铯蒸气的灯泡，它们原子最外层电子的极性可能正常，但能量减少，电磁波束发生了一定量的频率改变。这是因为为了对铯电子磁场发生作用，一大部分电磁波能量被吸收了，这其中绝大部分能量被用来反转铯原子外层电子磁场的极性，通过检测从灯泡中射出的电磁波强度，可以得到被吸收能量的数量，通过这种方式，可以对无线电磁波进行精确调节，使它和铯原子以相同频率发生“共振”，再用得到的精确频率驱动时钟。

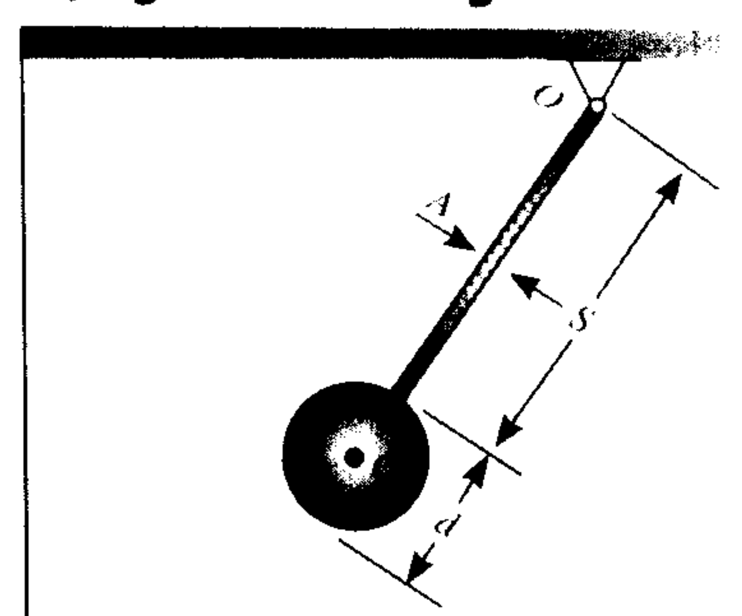
在非零度条件下，铯蒸气中的铯原子会发生不规则运动，尽管这种运动是正常现象，但是它会成为影响铯原子钟精度的重要因素。为了克服这个问题，最新版本的原子钟有六条激光轻轻地将铯原子压成球状并将它们向上推，如喷泉一样，直到小球达到静止并在重力作用下慢慢往回落。就在铯原

子球达到轨道最高点的静止状态时，将电磁波束通过铯原子球，这就是所谓的“喷泉钟”，目前精度最高的铯原子钟形式。时间前进的节拍就这样通过自然界固有的标准，被坚定地、绝对地固定和确定下来，时间的基本单元——1 秒钟——现在在国际上就是如此定义的。[1]

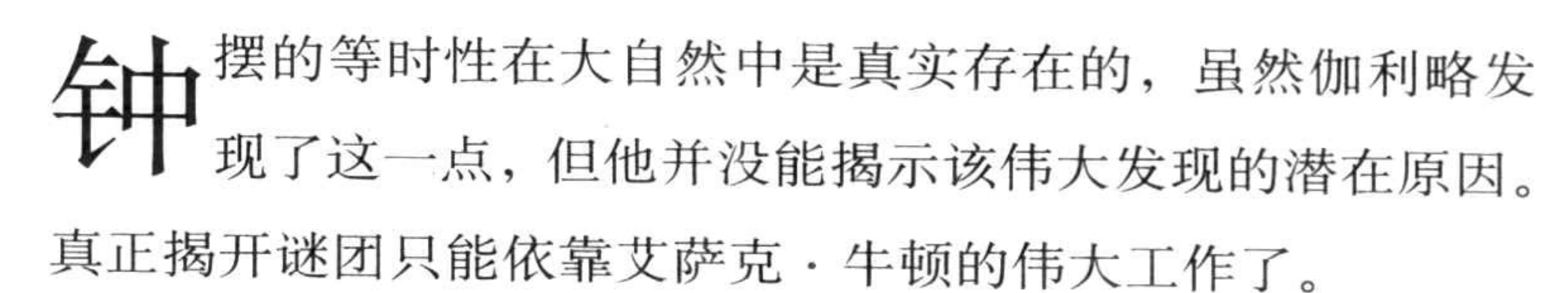
从伽利略着迷于比萨大教堂中摆动的吊灯说起，我们已经随着这个传奇的故事走出了很远的路程。无论是商业还是科学，时间的测量对于现代生活的方方面面而言都是至关重要的。但无论是通过什么方式，其核心的科学原理都无异于伽利略的钟摆和振动所依据的原理。当我们思索那些潜在的物理规律时，我们将会发现，所发生的一切不仅改变了我们对于时间流逝的观念，而且改变了我们对于世界结构的认知。

钟摆的物理属性使其在人类发展史上做出了革命性的贡献，为了能更好地理解这些属性的基本物理学原理，我们必须将描述的立足点从历史转向科学。同时，我们也必须再次追溯到三个多世纪之前，去回首伽利略逝世后的那些日子。

第六章



牛顿：钟摆的物理学原理



钟摆的等时性在大自然中是真实存在的，虽然伽利略发现了这一点，但他并没能揭示该伟大发现的潜在原因。真正揭开谜团只能依靠艾萨克·牛顿的伟大工作了。

1642 年的圣诞节（按照格雷戈里历法这一天应该是 1643 年 1 月 4 日，不过当时的英国还没有采用该历法），牛顿出生于林肯郡的小镇乌尔索普。牛顿出生前父亲就去世了，所以他基本上是被祖母带大的。他是“一个衣着朴素、少言寡语但善于思考的孩子”，长大后也养成了孤僻的性格，不太愿意跟人接触。但他对拆装物品（他曾自己做了一个水钟）

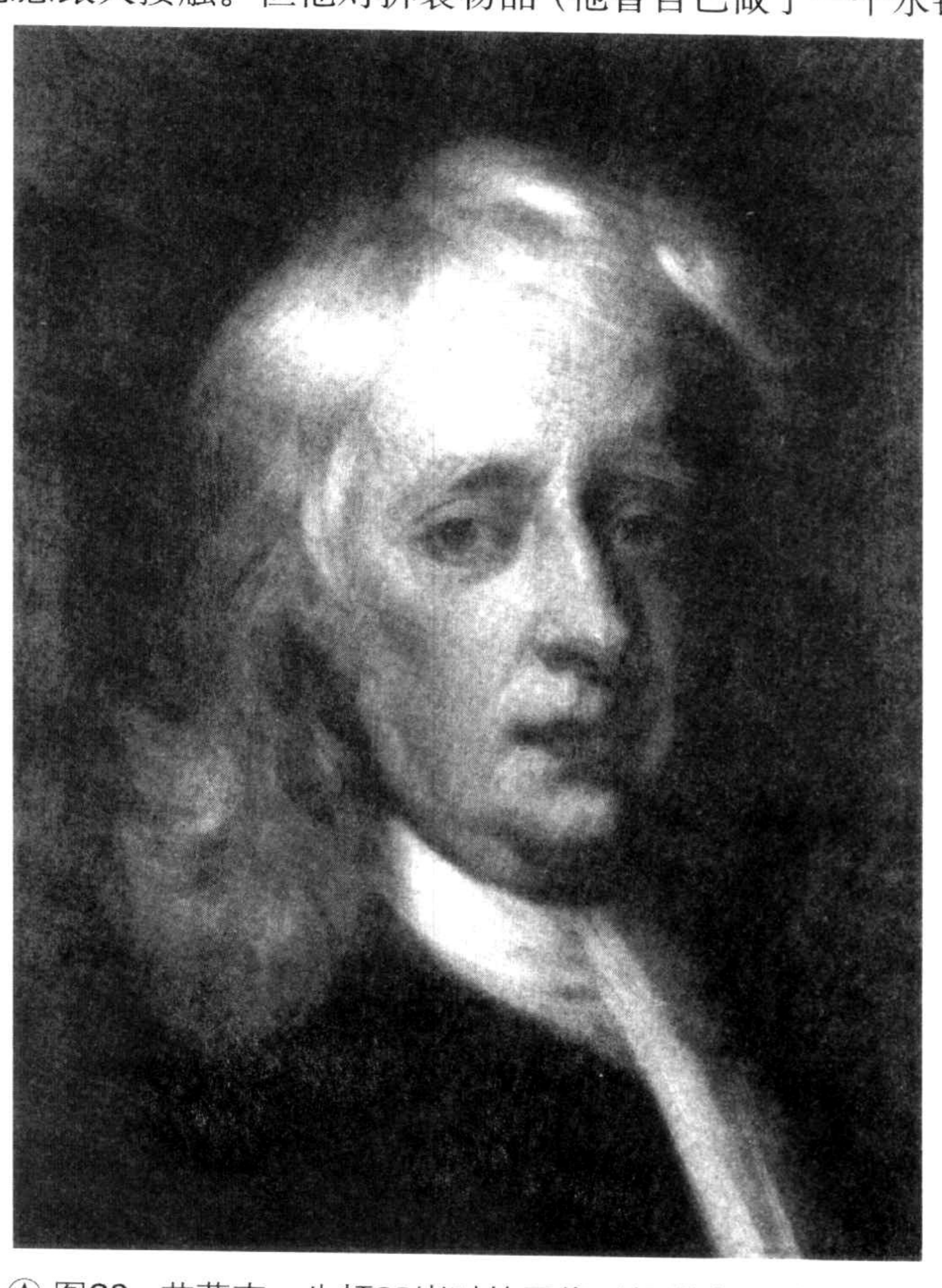


图20　艾萨克·牛顿83岁时的画像（伊诺克·希曼绘制）

和画图有着强烈的兴趣。[1] 牛顿的家里人都没有什么文化，他母亲曾试图让他成为一名农民。但在文法学校接受教育后(事实上学校的绝大部分时间都在学习《圣经》和拉丁文)，他的一位舅舅鼓励他继续在学业上深造。1661 年，牛顿以“半工半读”的身份进入剑桥大学三一学院学习，作为一名穷学生，牛顿完全靠给其他人服务支撑自己的学业。1665 年，牛顿本该拿到学士学位的一年，英国发生了瘟疫，剑桥大学因此几乎停办了两年，在此期间，牛顿回到老家度过了大部分时间。

此时正值“奇迹年”(anni mirabilis，出自拉丁文“annus mirabilis”，被用来描述 1666 年。这一年，英国诗人约翰·德莱顿写下了题为“Annus Mirabilis：1666”的长诗，歌颂英格兰舰队战胜荷兰舰队的丰功，以及伦敦城浴火重生的奇迹。——译者注)，在完全孤立的状态下，牛顿奠定了他在数学、天体力学和光学领域绝大部分开创性工作的基础。回到剑桥后，牛顿被任命为三一学院的董事，并在 26 岁的时候成为了剑桥大学的鲁卡荪数学教授。牛顿在剑桥大学呆了整整 30 年。虽然牛顿也和当时的其他一流科学家有过合作，但大部分的时间里，他还是热衷于做一个独行侠，无比兴奋地沉浸于神学的冥思中（他成为了一个狂热的阿里乌斯异端邪说的追捧者，这种信仰很可能会极大地影响到他在剑桥大学的未来发展)，沉浸在炼金术的实验中，沉浸在其巨著（《自然哲学的数学原理》）的编撰中。在牛顿的朋友、著名的天文学家埃德蒙·哈雷的资助下，这部作品在经历了漫长的波折后最终于 1687 年出版了，并随即在整个欧洲被公认为是一部划时代的巨著。在这部作品中，牛顿介绍了万有引力定律、运动定律和微积分。微积分是牛顿发明的一种数学计算

方法，特别适合于在物理学上应用。微积分宛如一颗火种，最终带来了为数众多的各数学分支的出现和蓬勃发展。这些运动定律和万有引力定律把树上落下的苹果和地球轨道以及月球的运动紧密地联系在了一起。

《自然哲学的数学原理》出版后，牛顿跟外界的接触开始多了起来。他被选为了剑桥大学在议会的代表（剑桥大学和牛津大学在议会都有自己的代表）；他遇到了克里斯蒂安·惠更斯（牛顿并不赞同惠更斯的光波理论）；他还几乎乐此不疲地跟其他的著名科学家争论不休。牛顿曾在出版的著作中引用了罗伯特·胡克的研究成果，但却并没有适当地对其表示感谢，而后者在皇家学会里也同样以喜好争辩著称，因此两位科学家为此事大吵了一通。牛顿还不公正地控告德国数学家戈特弗里德·威廉·莱布尼茨剽窃，事实上两人先后独立发明了微积分。这场争论让英国和欧洲大陆的数学家们在很长的一段时期内处于疏远状态。最终，数学界采用了莱布尼茨的方法和符号，而不是牛顿的。紧张的工作和无休止的争吵让牛顿变得极度消沉，从此以后他开始把兴趣转移到其他方面。1699年，牛顿被任命为伦敦造币厂的厂长，三年后他被选为皇家学会的主席并在此职位上一直工作到生命的最后一刻。当选主席后不久，牛顿就被安妮女王授以爵位，从此就被称为艾萨克爵士了。

1704年，牛顿将自己对光的性质的研究成果进行整理，出版了另一部科学巨著《光学》。他是第一个制造出反射式望远镜的人，他还通过实验得出了一个至关重要的新结论：白光是由不同颜色的光组成的。虽然取得了巨大的成就，但牛顿对光的基本属性的认识却被证明是错误的，他认为光是由固体微粒组成的物质。惠更斯的波动理论相对更接近于事

实，不过其理论在大约200年后也难逃被修改的命运。牛顿是现代科学革命的奠基人，正如他自己所描述的那样，他是“站在巨人的肩膀上”，接过了伽利略传来的接力棒。1727年，牛顿与世长辞，英国隆重地举行国葬仪式将他安葬在威斯敏斯特大教堂，法国启蒙思想家伏尔泰参加了牛顿的葬礼，在他的眼里，葬礼的隆重程度丝毫不亚于一位国王。

为了更好地理解伽利略所发现的钟摆属性的潜在原理，我们不能不让自己回顾一下牛顿的运动定律。就钟摆而言，牛顿三大定律对钟摆的振动做了全面的描述，其中也提到了振动的周期与摆动的振幅无关，而前提是振幅不能太大。

从伽利略开始，物理学就开始了与亚里士多德的告别之旅，正是牛顿的新物理学理论为此次旅行画上了圆满的句号。这位古希腊的哲学家曾经认为物体只有在受到外力作用时才会运动，在接下来的近2,000年里这种观点被世人普遍认可。而牛顿第一定律却认为：在不受任何外力作用时，物体将保持静止或匀速直线运动状态；外力的作用是使其做加速运动。（从广义上来讲，物理学上的“加速”不仅可以指速度加快，还可以指运动方向的改变。）牛顿第二定律则特别指出物体的加速度 a 跟作用力 f 成正比，跟物体的质量 m 成反比，加速度方向与力的方向相同。用公式表示就是 $f=ma$。如果有几个物体相互施加作用力——牛顿第三定律指出：两个物体之间的作用力与反作用力总是大小相等，方向相反，作用在一条直线上——那么第二定律适用于所有相互作用的物体。给定物体的初始位置和初始速度，经过一段时间后，如果要确定所有物体的位置，就需要借助牛顿的微分学来解算这些方程式。在接下来的250年里，基于牛顿的成就，在物理学和数学领域有了很多新的发展和新的发现。

在实际应用牛顿第二定律——运动方程——并将其用于解释钟摆现象之前，我们可以通过以下推理得出惠更斯的观察结论，也就是：钟摆的运动周期 p 与摆长的平方根成正比。物理学家将此推理过程称之为“量纲分析”，该分析所涉及的基本变量有长度、时间、质量和可以通过自由落体加速度 g 算出的重力。别忘了，依据伽利略的观点，所有物体的自由落体加速度都是相同的，这个速率为 32 英尺 / 秒，也就是说，每过一秒钟，速度的增加是每秒 32 英尺。加速度是指单位时间内的速度变化，而速度是单位时间内的距离变化，因此加速度 g 的量纲为：（距离 / 时间）/ 时间 = 距离 / 时间 ^{2}。由于伽利略已经发现钟摆的周期与振幅无关，而剩下的可见变量只有摆长 l、重力加速度 g 和摆锤质量 m，从这几个变量中唯一能算出振动周期 p——量纲“时间”的一个变量——的方法就是长度 l 除以重力加速度 g，消掉距离后，就得到了一个时间的平方，然后，通过对得出的结果开平方就能算出“时间”。通过上述推算可以得出结论：摆动周期 p 肯定与 l/g 的平方根成正比（注意，量纲分析还告诉我们：钟摆的振动周期不随摆锤质量的变化而变化，因此要得到纯粹的时间，没有任何其他相关的变量能取代量纲“质量”，达到消掉 m 的目的。）事实上，如果进一步对牛顿的运动方程进行推理，就可以得出公式 $p=2\pi\sqrt{l/g}$，我们随后将提到这一点。然而，惠更斯根本没有采用上述的论证方法，他是通过实验发现了钟摆的特性。

为了解释和详细描述简单钟摆的小角度摆动，我们需要应用牛顿第二定律，并做一些数学计算（任何对数学过敏的读者都可以跳过以下几页）。如图 21 所示，作用力 F 指向摆锤的平衡位置，因此与摆锤距离中心位置的位移方向相

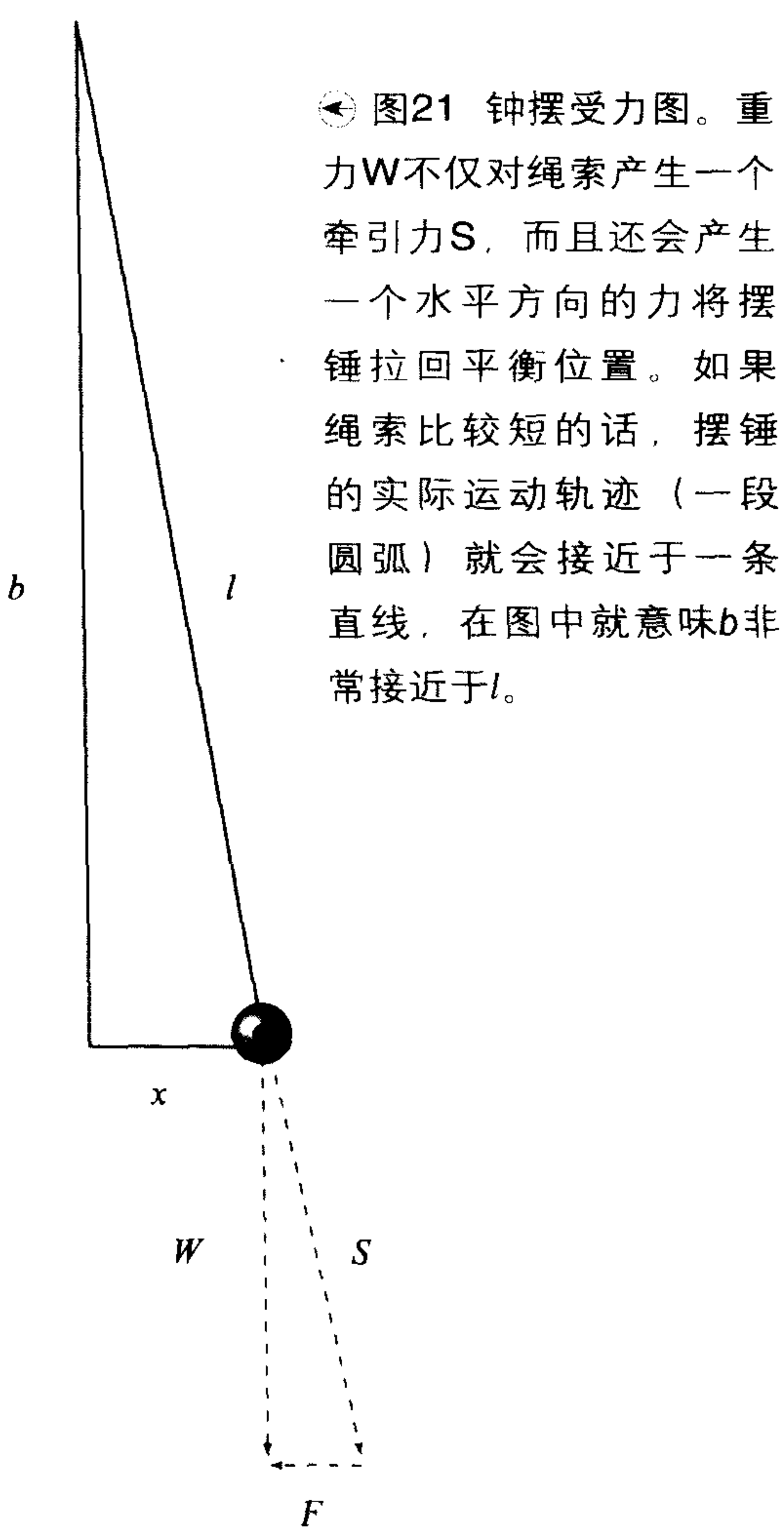


图21 钟摆受力图。重力W不仅对绳索产生一个牵引力S，而且还会产生一个水平方向的力将摆锤拉回平衡位置。如果绳索比较短的话，摆锤的实际运动轨迹（一段圆弧）就会接近于一条直线，在图中就意味b非常接近于l。

反。上下两个三角形为相似三角形，这意味着 $F/W= x/b$，而 x/b 非常接近于 x/l（如图所示，x 要远远小于 l），所以使摆锤做加速运动的力 F 的计算公式为 $F=xW/l$。换个角度来说，如果这个摆锤不是吊在一根绳索上，而是做自由落体运动，那么其加速度将会是重力加速度 g，根据牛顿第二定律可知 $W=mg$，这就意味着摆锤在水平方向所受的作用力 $F=xm(g/l)$。

因此，决定简单钟摆或者谐振器运动的方程表明：钟摆

的加速度跟偏离中心位置的位移大小成正比，方向与位移方向相反。摆锤摆得越高，速度减小的就越多，直到运动停止然后向相反方向摆动。由于从摆动的最高点算起，加速度与摆锤的运动方向相同，摆锤处于加速运动状态，直到穿过平衡位置为止，从中心位置开始摆锤的位移变为负值，而加速度为正值，因而摆锤会再次慢慢停下，然后开始回转。此外，当偏离中心位置的位移为 x 时，摆锤的加速度 $a=F/m=x(g/l)$。

该方程的推理过程可以通过示意图呈现（参见图 22）。由于摆锤的摆动速度始终处于变动状态，如果振动的正弦曲线如图所示且反复左右振动，那么图中摆锤偏离中心位置的距离 x（基于时间变化绘制）会是一个倍数。该曲线是一个正弦函数：$x = A \sin y$。常数 A 是钟摆的振幅——即钟摆的最大摆动距离——不是由该方程决定的，而是取决于其初始摆动速度或角度的大小。另一方面，y 与时间 t 成正比，角 y 随速度的增加而相应加大，而速度决定了钟摆的振动周期 p，即摆锤完成一次完整的往复摆动所需的时间，该时间与角 y 完成一个闭合循环，即增加 360 度的时间相同，等于 2π 弧度（角 y 的弧度值指的是以孔径角 y 和半径 l 组成的一块比萨饼的外皮表面长度，这也意味着 360 与 2π 之间存在对等的关系）。由此我们得出公式 $y = 2\pi\ (t/p)$，当时间等同于一

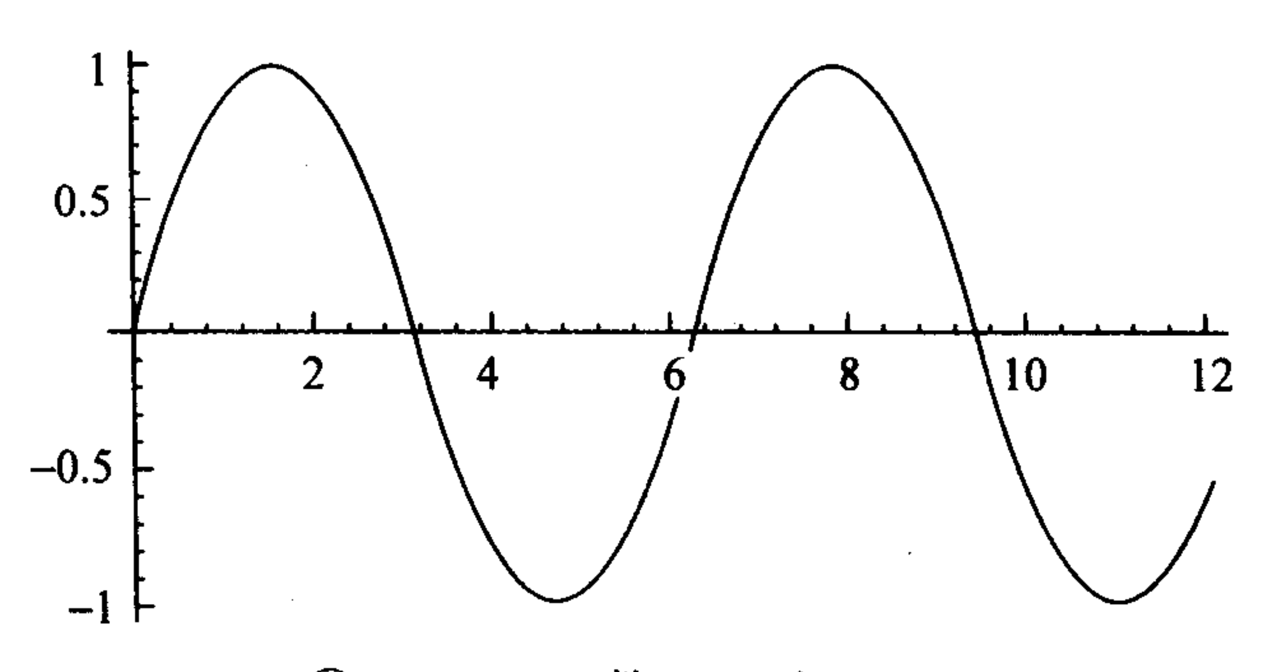


图22　函数sin示意图

个周期时，$y = 2\pi$。除了摆动周期，还可以用频率来表现该方程，也就是每秒钟摆动的次数。如果每秒钟摆动两次，那么很显然完成一个往复摆动所需的时间为半秒钟；如果一秒钟摆动三次，那么完成一次往复摆动所需的时间就为1/3秒：摆动频率f与周期p成反比，$f=1/p$。由此我们可以推出：$y=2\pi ft$。

正弦函数$x = A\sin(2\pi ft)$有一个重要的数学属性，在时间t的加速度为：$a = (2\pi f)^2 A\sin(2\pi ft) = (2\pi f)^2 x$。根据上文我们知道$a = F/m = x(g/l)$，由此可以得出：$(2\pi f)^2 = g/l$，或$p = 2\pi\sqrt{l/g}$，这与我们在前面通过量纲分析推算出的方程完全一致（数学运算的小插曲到此结束，对数学过敏的读者可以松口气了）。

牛顿第二定律的运动方程不仅解释了谐振器的详细工作原理，而且还蕴含了钟摆的另一个重要特性。该特性是法国物理学家让·伯纳德·莱昂·傅科发现的，他当时利用照相机（银板照相法刚刚发明）研究天文学，该照相机使用了钟摆驱动的机械装置，在对该装置的敏锐观察中，他发现了钟摆的这一特性。傅科于1819年出生于一个书商和出版商家庭，他是一个身材瘦小、体弱多病的人，在巴黎度过了自己的一生。傅科做出了几项重要的科学贡献，其中之一就是在实验室里测出了在真空状态下和在水中的光速。

傅科所发现的钟摆特性是这样的：钟摆的摆动平面——也就是包括固定悬架和悬挂摆锤的绳索在内的垂直平面——会沿着穿过悬点的垂线缓慢旋转。依据牛顿运动定律所暗含的“角动量守恒原则”，钟摆的摆动平面在空间上是固定不变的，傅科意识到他所发现的旋转的根源就在于此，他因而得出了一个结论：此现象是地球在围绕地轴自转的最直接和最直观的体现。要想更容易地理解这一点，可以设想在地球的北极点上悬挂一个钟摆；钟摆下面的地球当然会围绕地

轴旋转，但钟摆的摆动平面在空间上是固定不变的，对于站在地球上的观察者来说，看到的并不是地球在转，而是摆动平面在旋转。由于摆动平面的旋转角度非常小，所以这种转动效果在其他地方很难形象地体现出来，不过其原理却是不变的。为了向公众展示这一现象，傅科别出心裁地在巴黎万神殿的圆穹顶上悬挂了一个巨大的钟摆，当时的场面可谓壮观。今天，世界各地的科学博物馆都还在向公众展示着大型的傅科摆。巴黎万神殿的巨大钟摆也还保留在那儿。借助该发现和基于角动量守恒原则的分析，傅科发明了陀螺仪，该装置后来在航海中得到了极为重要的应用。傅科于 1868 年去世，年仅 48 岁。

谐振器可以说是伽利略所看到的枝形吊灯的抽象版本，在牛顿以后，所有物理学领域几乎都可以见到谐振器和图 22 中用于描述其运动的正弦函数的身影。在历史上，该函数的起源要追溯到公元前 3 世纪的希腊，在天文学中得到特定应用的几何学孕育了该函数。到了近代，为了描述物理系统的运动和外在表现，该函数被革命性地引入动力学领域，并引起了很大的反响；这些反响出现的标志即是运用牛顿第二运动定律来分析钟摆。就经典力学而言，此谐振器函数的普遍存在是基于一个最主要的原因：与偏离中心的位移成正比的引力可能是一种极为普遍的状况，也就是说，引力的变化与 x 成线性关系。这种线性或成正比的特点同样适用于拉伸的弹簧和压缩的晶体所释放的力，摆轮游丝能够取代钟摆用于制造可靠的机械时钟，而利用电能的石英晶体又最终取代了摆轮游丝，无不是基于上述的引力特点。

另外，即便作用于一个物体的引力变化并不与距离成正比，在绝大多数的情况下，依据线性相关性，对于较小的位

移来说，也存在大致相同的比例关系。当然，这也正是钟摆的实际情况所在：当摆幅较大时，将摆锤拉回平衡位置的力的大小并不完全与距离成正比；如果用一条直线取代摆锤经过的弧线，在图 21 中用 l 取代 b，那么前文提及的大致相同的比例关系也就没有意义了。伽利略所观察到的振动周期与摆幅无关的现象只适用于摆幅较小的钟摆，在整个运动过程中摆锤偏离平衡位置的角度都要比较小才行。对于摆幅更大的钟摆，则必须依据惠更斯发明的更巧妙的办法进行调整，惠更斯曾断言：即便如此，钟摆的恢复力依然能够保持线性特征。

因此，与时间相关的正弦曲线是一种普遍存在的现象，几乎可以用来描述自然界中所有的微小振动。我们随后还会用到其最重要的属性，所以有必要在这里再强调一次：在任意时刻，加速度与位移倍数的负值相等，而倍数的大小与振动频率的平方成正比，即 $(2\pi f)^2$。

牛顿去世后近一个世纪，在数学上有了一个新的发现。为了理解谐振器更为广泛的适用性，我们有必要来了解一下这个主要应归功于让·欧迪斯特·约瑟夫·傅立叶的新发现。1768 年，傅立叶出生于法国小城欧塞尔，其父亲是一名裁缝。傅立叶 9 岁就成了孤儿，后来在一个军事院校接受了教育，并在那里首次萌生了对数学的浓厚兴趣。长大后，傅立叶成了一个兴趣广泛的多面手，他既有远大的政治抱负，也不乏管理方面的天赋。在法国大革命期间，他因替恐怖统治下的受害者辩护而被罗伯斯庇尔逮捕，后被释放；罗伯斯庇尔被处死后，他又因涉嫌支持罗伯斯庇尔再次被捕，并在监狱里经受了一段短暂的煎熬。

随后，傅立叶被拿破仑的魅力所折服，参加了远征埃及

的战役。他曾被拿破仑委以各种外交职位和高层管理职位。他还曾被封为男爵，最终被封为伯爵，但当拿破仑从厄尔巴岛回国后，他毅然辞掉了所有的职位，以示对拿破仑新的统治的不满。从那以后，他便将所有的时间投身于数学研究，之前他只能在业余时间从事研究。傅立叶后来成为了法兰西学院的院士和英国皇家学会的外籍会员。他在埃及参加战斗时曾经患病并因此留下了病根，1830 年，傅立叶旧病复发，与世长辞。

傅立叶发现，任意给定的时间函数都可以分解为几个不同频率的正弦函数。换句话说，图 22 中所描绘的正弦曲线状态可以被看作是任何与时间相关的其他状态的基本组成部

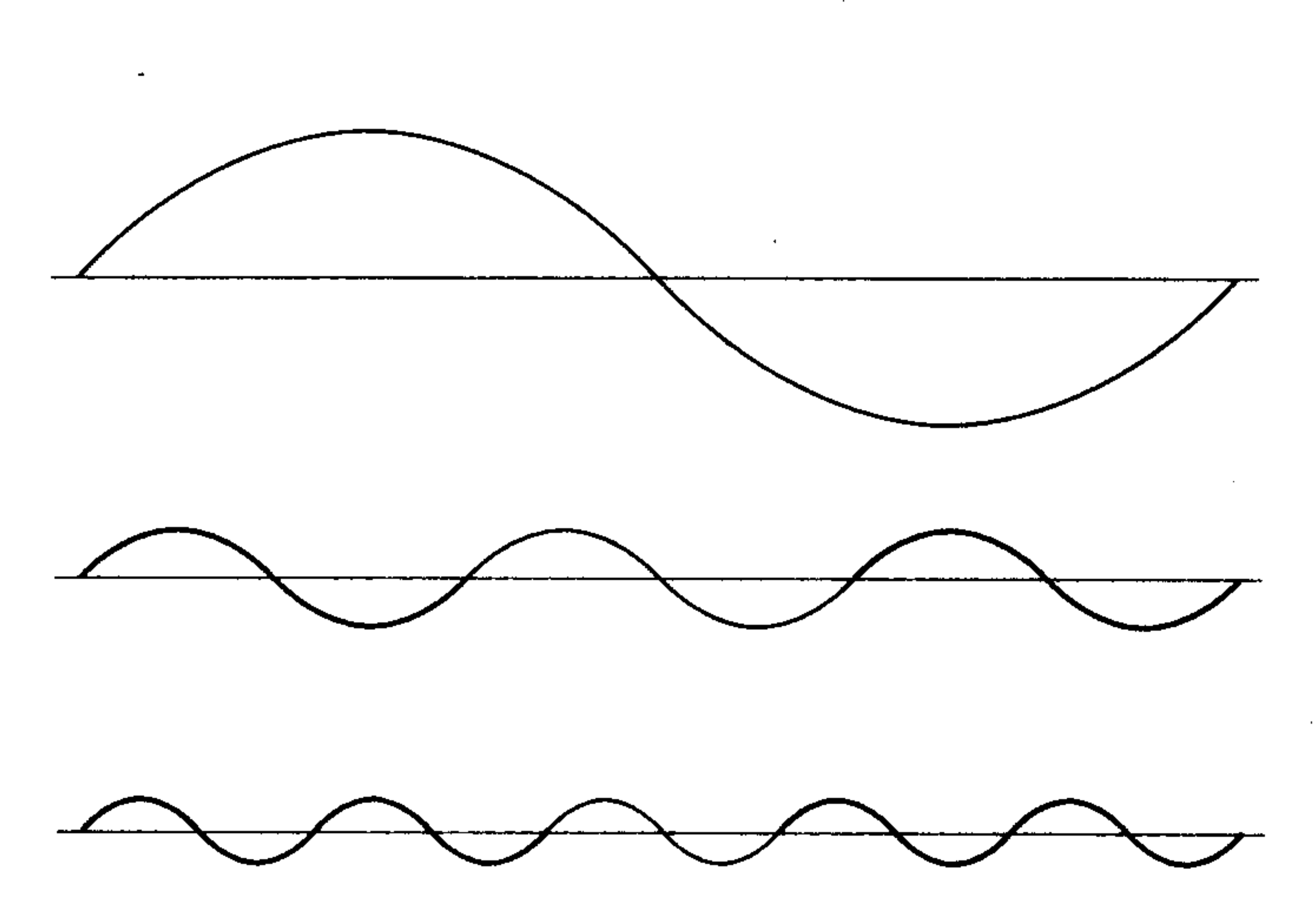


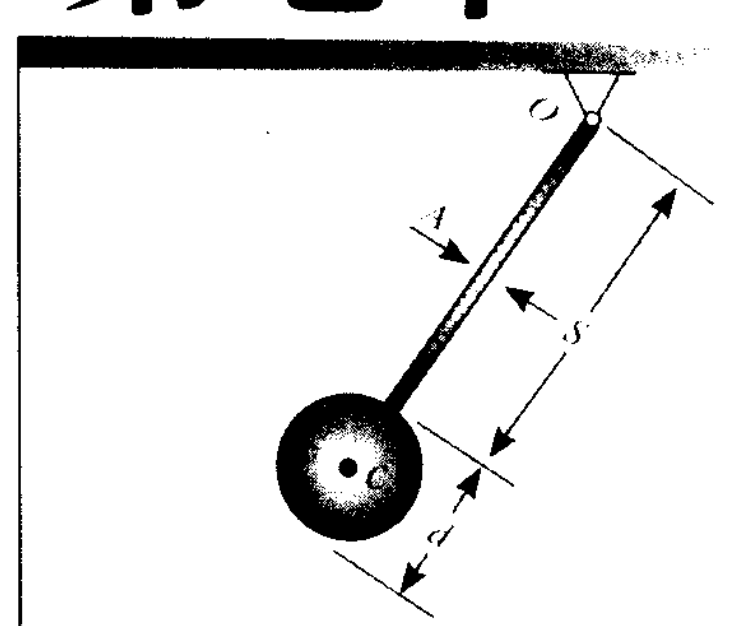
图23　最上面的曲线由两条水平线组成，是无穷多的正弦曲线（每一曲线都乘以一个正的常数或负的常数）叠加的总和。下面呈现的是其中的三条正弦曲线。

分，而后者是许多不同频率和振幅的正弦曲线叠加的结果。任意给定的函数都有其唯一的“傅立叶系数”，用以描述其中每一频率的强度大小。

举例来说，假定使一股电流在一秒内瞬间达到最大强度 –C，然后瞬间转向另一方向在一秒内达到 +C，它就能被描述为一组频率分别为 1/2、3/2、5/2……圈 / 秒的正弦振动之和。就像图 23 所呈现的一样，所有振动都有各自的振幅，分别为 1、1/3、1/5……

从物理学上来讲，通过肉眼观察任何一种由很多——通常是无限多——周期不同的谐振器产生的随时间变化的现象，就可以解释这种分解作用。此外，为了分析这些现象，在许多情况下，只要每次分析一种频率就足够了，因为所有频率的负加速度都与位移和频率平方的乘积成正比。这种分析方法相对也比较简单易行。这种简化将很多现象象征性地变成了钟摆的聚集体，特别适用于在 19 世纪发展起来的两个物理学新领域——声学和电磁学，下面我们就将转入对这两个领域的介绍。

第七章



声与光：
无所不在的振动

原始声学研究始于萨摩斯岛的毕达哥拉斯（约公元前560年—约公元前480年），他是古希腊的哲学家、数学家和神秘主义者。但关于其生平和学说的记载矛盾重重，而且这些记载都是在其逝世后200年左右才出现的。毕达哥拉斯曾在埃及和巴比伦广泛游历，最后定居于意大利南部的克罗托内，并在那里建立了一个颇有影响的哲学和宗教协会。

毕达哥拉斯相信“万物皆数”。他拿自己的七弦琴琴弦做实验，并进而形成了一种理论：最优美和谐的音符与最简单的数字比率存在一定的对应关系，比如，弦长比为2:1对应的是八度音程，弦长比为3:2对应的是五度音程，而弦长比为4:3对应的是四度音程，如此等等。这就是我们今天所说的音程的源泉，也是声学的原科学研究的起点。后来的亚里士多德（公元前4世纪）、罗马工程师维特鲁维厄斯（公元前1世纪）和罗马哲学家波伊提乌（公元6世纪）都曾对声学的发展做出了卓越的贡献。

然而，真正将声学转变为一门科学的却是与毕达哥拉斯相差两千年之遥的伽利略。他对振动进行了研究，并描述了振动频率与音调之间的关系，波伊提乌曾暗示两者之间存在一定的联系。伽利略所发现的钟摆的等时性，也是其基于对音乐的爱好而做的实验的结果。因此，对声音和谐振的研究向来都是密切相关的，两者之间有着很深的历史渊源。法国数学家马兰·梅森（1588—1648）对绷紧的琴弦进行了更为深入细致的研究，并基于其研究成果于1636年出版了著作《和声论》，马兰·梅森的研究最终成为了孕育音乐声学的摇篮。然而，在艾萨克·牛顿用公式表述其运动定律之前，还没有人能够真正理解振荡琴弦的运动。牛顿运动定律发表40年后，荷兰籍瑞士数学家和物理学家丹尼尔·贝尔努利

(1700—1782) 才第一次将这些定律广泛应用于振荡的研究。贝尔努利家族完全可以被看作科学上的巴赫家族：贝尔努利和他的父亲、叔叔、两个兄弟、一个表兄和两个侄子都对物理学和数学的发展做出了重要的贡献。

在英国物理学家约翰·W. 斯特拉特的推动下，声学科学这个幼小的花骨朵开始慢慢绽放。1842 年，斯特拉特生于英国埃塞克斯郡的兰福德格洛夫，他的父亲是一位男爵。父亲死后，斯特拉特继承了爵位，瑞利男爵成为了他更广为人知的名字。斯特拉特将自己的一生都献给了科学事业，并在自己的家乡设立了一个实验室。对于一名世袭贵族来说，不在军队、政府或教会供职反而投身科学尤其显得弥足珍贵。瑞利男爵曾被选为英国皇家学会主席和剑桥大学校长，他的研究覆盖了现在被称作“经典物理学”的所有领域，并且其中的一部分研究工作对发生于 20 世纪早期的物理学革命起到了一定的推动作用。瑞利男爵出版了很多著作，其中的两卷本论文集《声学理论》是具有里程碑意义的经典之作，其在声学领域的“圣经”地位保持了近一个世纪的时间。1919 年，瑞利男爵走完了自己辉煌的人生历程。

声音到底是什么？毕达哥拉斯所发现的那些神秘数字背后隐藏着什么科学原理？而声音又和钟摆有什么关系呢？直到 17 世纪，人们依然普遍认为：之所以能听到钟表的铃声，是因为有一些肉眼看不到的固体微粒从声源传到了人的耳朵里。这种观点的可信度最终被一个著名的实验击打得支离破碎。第一个做此实验的是德国学者阿塔纳修斯·基歇尔，他在 1650 年出版的著作《世界音乐》中对此实验进行了描述，此后又有数不清的人在演讲时将该实验展示给听众。基歇尔将一个钟表放入一个封闭的瓶子里，然后通过一个泵逐渐抽

出瓶里的空气，让听众听钟表的声音，会发现声音变得越来越小，最终就几乎听不到声音了。然而，由于缺乏一个功率足够强大的泵，所以很难让瓶子达到理想的真空状态，因此也不能让声音完全消失。结果基歇尔得出了一个错误的结论：声音无须空气即可传播。10年后，爱尔兰物理学家罗伯特·玻意耳发明了经过改良的真空泵，直到此时上述实验才得以完美地展示给大众。在18和19世纪，人们逐渐清晰地认识到：事实上，声音是由周围环境的细微压力变化组成的，由发出振荡的发声体发出，教堂的钟表、爆炸物、声带、乐器等都是这样的发声体。

为了弄清楚通过弹拨琴弦发声的乐器所蕴含的物理学原理，让我们来看一下当一根绷紧的琴弦被弹拨的时候发生了什么吧（参见图24）。（再次提醒那些对数学过敏的读者：接下来的这几页还要涉及到少量的数学运算。）假定质量的每一小部分都适用于牛顿的运动方程 $F = ma$，我们先来考虑左侧的情况。当指向平衡位置时，弯曲的琴弦的每一段都会受到两个拉力 T_1 和 T_2，两者虽然方向几乎相反，但并不完全处于一条直线上，其结果就是这两个拉力并不能完全相互抵消。(此种情况下重力造成的影响很小，可以忽略不计。)因此，琴弦所受的合力——该合力是由斜率的变化造成的，而斜率是偏离平衡位置位移的变量——会与琴弦单位长度内位移变

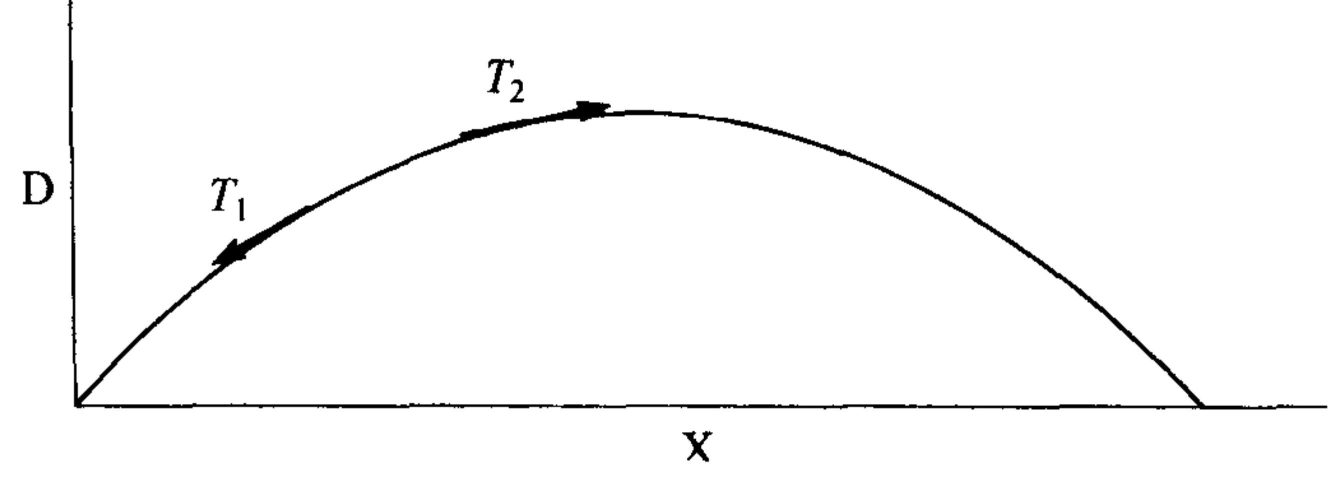


图24　一段绷紧的琴弦所受的力（图中琴弦的弯曲度被人为地夸大了）

化的多少成正比，正如加速度是指单位时间内速度变化的快慢一样；你可以将其称为拟加速度。由此得出的方程被称为波动方程，其左边是与距离 x 相关的拟加速度，而右边是真实加速度。此方程广泛存在于物理学的诸多领域。

现在，我们利用傅立叶的理论将注意力集中在一个给定的频率 f，这让我们可以用 f^2 与一个负常数的乘积再乘以位移 D 代替波动方程右侧的加速度，由此得出的方程在形式上会与谐振器的运动方程一样，不同的是拟加速度是距离 x 的函数，而真实加速度是时间 t 的函数。不过拟加速度的求解依然是一个正弦函数，而琴弦的位移 D 肯定是 $\sin(bx)$ 的倍数（如果琴弦被固定于距离 $x = 0$ 的位置，那么位移 $D = 0$），由此我们知道拟加速度与位移和 $-b^2$ 的乘积成正比。由于方程右侧与 $-f^2$ 成正比，而左侧与 $-b^2$ 成正比，因此得出 f 与 b 成正比。

然而，琴弦的长度 L 事实上受到了一定的限制：它的两个端点是被固定的。这就意味着在 $x=0$ 和 $x=L$ 时都会得出 $D=0$。当 $bx= 0, \pi, 2\pi, 3\pi$ ……时，函数 $\sin(bx)$ 会变为 0，由此得出结论常数 b 并不是一个任意值，而必须是 $b=\pi/L, 2\pi/L, 3\pi/L$……只有这样，当 $x=L$ 时，才能得出 $\sin(bx)=0$。（图 25 呈现了琴弦在不同振动频率下的振动曲线。）我们已经知道 f 与 b 成正比，而不同的振动频率与能够使琴弦产生振动的常数 b 成正比，所以毕达哥拉斯的猜测是正确的，即琴弦的振动频率也必须存在整数倍关系。第一个称为基波，第二个称为一次谐波，以此类推。

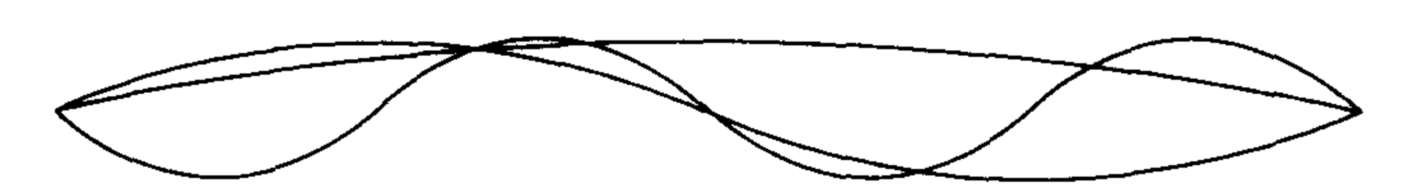
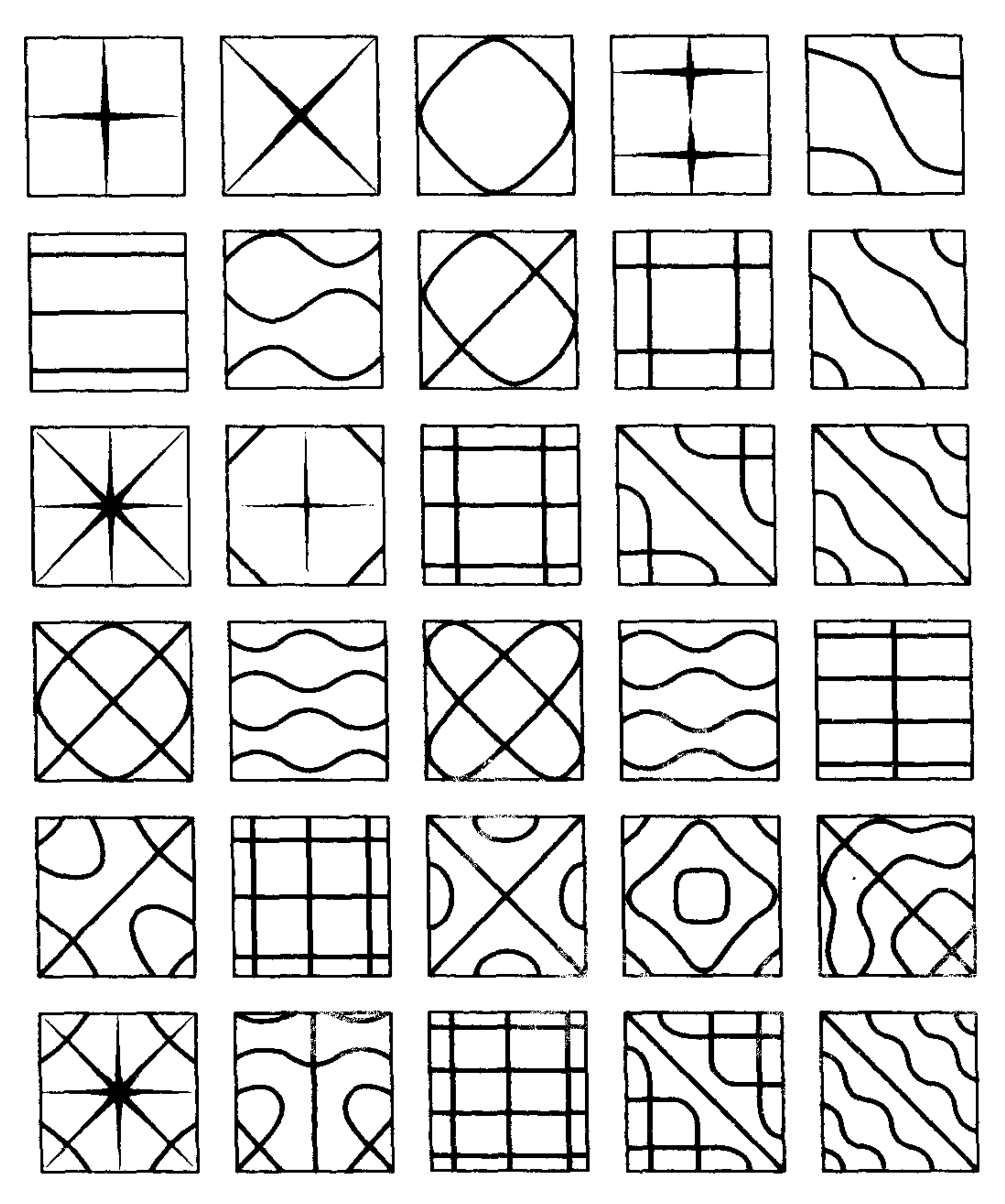


图25 绷紧琴弦的基波及其一次谐波和二次谐波

与琴弦类似，管乐器吹口和管风琴气柱的振动也蕴含着同样的物理学原理。不过对于打击乐器等二维结构来说，情况会多少有些不同。金属盘或者鼓膜的振动非常复杂，在表面会有一些错综复杂的节点线成十字形交叉，并在交叉点保持静止状态。德国律师恩斯特·克拉尼(1756—1827)是第一个直观地将这些优美的网状图形呈现出来的人。他将沙子均匀地撒在一个水平放置的金属盘上，然后用小提琴的琴弓敲打金属盘的边缘，沙子会在金属盘表面静止的地方聚集，而从振动的地方弹开（参见图26)。拿破仑·波拿巴对这些示范非常着迷，他专门为此设立奖项，授予能够解释这些图形的第一位数学家。1816年，一位名为索菲·杰曼的女士获得了该奖项，她曾被一所大学拒之门外。在上述情况下，振动的频谱，也就是能够使二维表面产生振动并形成十字交叉形节线的可用频率，要比单维琴弦的频谱复杂得多，而且完全取决于金属盘或鼓的边缘的形状。

现代乐器的琴弦——类似的理论也适用于管乐器的吹口和气柱以及打击乐器的表面——能够借助表面积更大的共鸣板将振动传递到周围的空气中，使之压缩或膨胀——以相同的频率—— 产生振动，这些振动以波的形式进行传播和扩散，并最终传到我们的耳朵。每一个单纯的音符都与谐振器的一个单一频率对应，这些频率的范围位于20—20,000赫兹之间。根据乐器的不同，音符也可能包含一些泛音——和声。另外，无论是刺耳的杂音还是悦耳的旋律，其中的任何一个声音都可以分解为不同的傅立叶分量；这个声音由空气的谐波振荡叠加组成，每一个谐波振荡都有一个固定的频率，其中有些我们能够听到，而另一些却听不到，听不到是因为它们的频率低于或者超过了我们耳朵的识别范围。无论是否能

够听到，每一个声音好像都蕴含着无数的伽利略钟摆。



Ⓐ 图26 用克拉尼图形呈现的方形盘子的振动模型

在19世纪，还出现了另外一门广泛应用谐振的科学——电磁学。对电力和磁力的认知可以追溯到古希腊时代（用于表示“电子”的英语单词electron来自希腊语，意思是“琥珀”，而琥珀是当时已知能够放电的唯一物质；*e lithos magnetis* 是一个希腊术语，描述的是铁矿石的一种形态，也就是我们今天所说的磁铁矿，它在地下的自然状态中被磁化），但那些断断续续的认知并没有形成为一个严肃的科学分支，这种情况一直持续到18世纪中期（回忆一下本杰明·富兰克林和他

在电闪雷鸣中放飞的风筝吧)，我们的故事将从 19 世纪讲起。

1791 年，迈克尔 · 法拉第出生于英格兰东南部萨里郡的纽因顿，他是一名穷困潦倒的铁匠的第三个儿子。法拉第没有受过多少教育，在数学方面他几乎是一无所知。14 岁的时候，法拉第被送往伦敦，跟一位书籍装订商学徒。法拉第是一个如饥似渴的读者，他阅读了拉瓦锡（法国科学家，通常被认为是“现代化学之父”）的著作，通过《大英百科全书》的一篇文章对电有了一些了解，还用不多的积蓄为自己建了一个实验室。从 19 岁开始，法拉第在城市

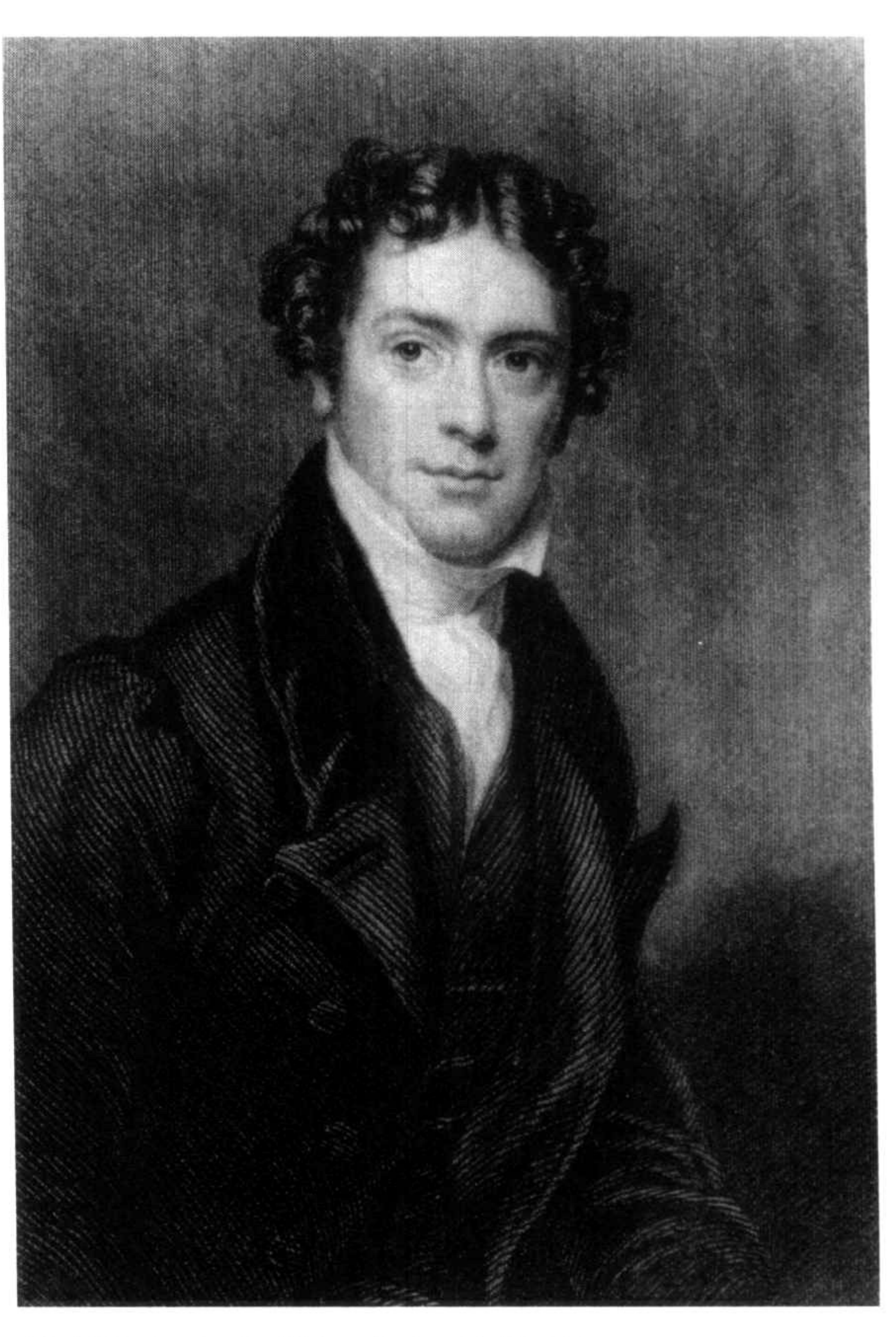


图27　年轻的迈克尔·法拉第

哲学学会开始了更为严肃的科研历程，他还在皇家科学研究所聆听汉弗莱·戴维的讲座，观摩汉弗莱·戴维的示范，并做了详细的笔记。21 岁的时候，法拉第的装订学徒生涯结束，他幸运地成为了戴维的助手，后者在一次实验室事故中受伤，造成双目暂时失明。

年轻的法拉第给这位伟大的化学家留下了非常深刻的印象，很快戴维就同意让他做自己的长期助手，并带他做了一次为期两年的游历，去法国和意大利拜访当时最一流的科学家。这次旅行让法拉第大开眼界，他很快就掌握了大量的科学知识。在接下来的 20 年里，法拉第在皇家科学研究所取得了巨大的成就，他在化学和电学领域的很多开创性发明都是在这里完成的。法拉第成了一名闻名遐迩、广受欢迎的学者，经常在公开场合做一些科学讲座，并吸引了大批的观众前往聆听。在 47 岁的时候，法拉第患了神经失常症，在长达六年的时间里他暂时告别了科研岗位。好转后法拉第又在科学的道路上前行了 10 年，并取得了很多新的成就。不过随后他的大脑功能开始衰退，这很可能是他在早期的实验中大量接触有毒物质留下的隐患。在生命历程的最后五个年头，法拉第退休，维多利亚女王为他在汉普顿宫安排了一个房间颐养天年。1867 年，法拉第与世长辞。

虽然迈克尔·法拉第是典型的实验科学家，可他却提出了一个具有开创性的理论概念，迄今为止，这种概念的影响力已经结出了累累硕果，并将法拉第与我们谈论的主题振荡器联系在一起。这种概念就是“场”。

当牛顿拟定革命性的万有引力定律公式时，几乎所有人都对这个定律产生了质疑，甚至牛顿自己也有些动摇了。太阳距离地球那么遥远，在没有直接接触的情况下，太阳怎么

能向地球施加一个外力呢？地球与月亮之间的万有引力也存在同样的问题。人们无法理解这种“远距离的作用”。在研究电荷之间的相互作用力、磁极之间的相互作用力以及外部电流对磁极的影响时，法拉第也面临着同样的困惑。不过法拉第提出了新的理论，他认为远距离物体之间的相互作用是通过“空间物质”传递的，而不是直接作用的。通过第一个物体创建的“空间物质”，将其作用在相邻点之间连续传播，直到抵达第二个物体所在的位置。法拉第所设想的这种“空间物质”是一种类似橡皮圈的东西，他将其称为“场线”，当然，对这个概念不能简单地从字面上断章取义。基于这样或那样的形式，将电场、磁场以及其他类型的场，包括重力场，看作“空间物质”的概念几乎是蕴含在物理学所有领域的一个最基本理论。由于法拉第的电学、磁学理论缺少一个数学公式加以推导证明，所以影响了这些理论全部作用的发挥，当伟大的实验物理学家法拉第逐渐退出历史舞台时，一位二十来岁的苏格兰物理学家提供了这样的数学公式。

詹姆士·克拉克·麦克斯韦于1831年出生在爱丁堡，他的父亲是一名律师，在密德比有一块祖传的麦克斯韦地产。麦克斯韦从小在其父母位于格伦莱尔的乡间居所里长大。约翰·克拉克·麦克斯韦是一个近乎狂热的科学爱好者，他很重视对孩子的科学启蒙教育，希望也能引导儿子走上科学的道路。妻子去世后，他把詹姆士·麦克斯韦送到爱丁堡接受教育。詹姆士·麦克斯韦最初是在爱丁堡学院（15岁的时候他在皇家学会宣读了自己的第一篇数学论文）学习，随后转入了爱丁堡大学。从剑桥大学毕业后，詹姆士·麦克斯韦在阿伯丁的马歇尔学院谋到了一个自然哲学教授的职位，随后他就被任命为伦敦国王学院的自然哲学和天文学教授。父亲

的去世让他回到了位于苏格兰的家乡，他在那里度过了六年，孜孜不倦地在科研的道路上阔步前行。在 40 岁的时候，詹姆士 · 麦克斯韦回到了剑桥大学，他成为了实验物理学的首席教授，并建立了卡文迪什实验室。1879 年，49 岁的詹姆士 · 麦克斯韦死于癌症。

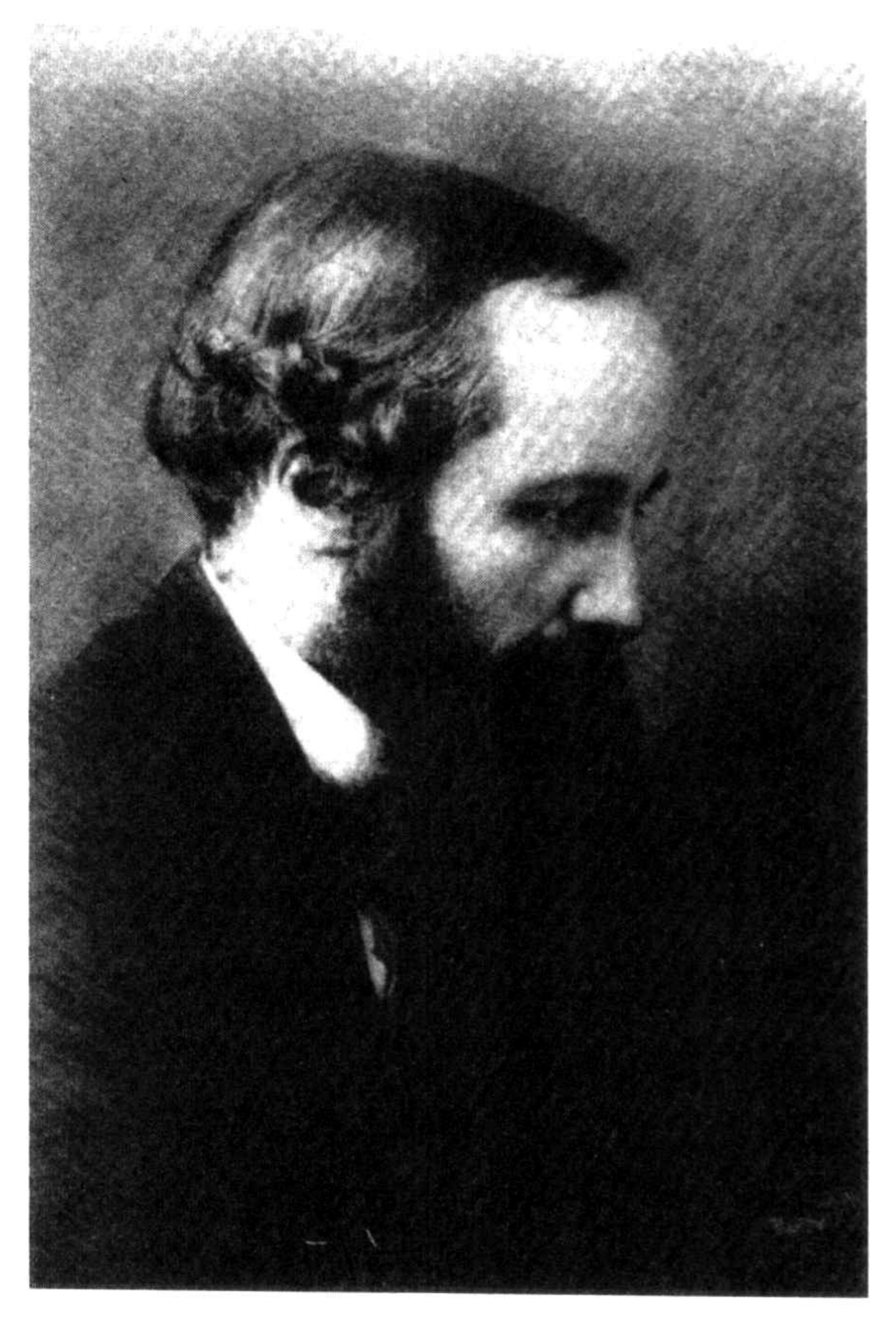


图28　詹姆士·克拉克·麦克斯韦

麦克斯韦对物理学的卓越贡献覆盖了几个学科，其中包括天文学和气体分子运动论，但就我们讲述的故事来说，其中最具吸引力的无疑是电学和磁学，在此领域麦克斯韦发现

了一种新的类似伽利略钟摆的振动。虽然最初这两门学科是非常独立的，但我们现在知道，两者之间有着密不可分的联系。有三位科学家在探寻两者之间的密切关系上做出了贡献：第一位是迈克尔·法拉第，他发现了与电线存在相对运动的磁铁会在电线内产生电流，并通过实验演示了这种现象；第二位是法国物理学家安培（1775—1836），他发现了通电的电线之间可以产生相互作用的磁力；最后一位是丹麦物理学家汉斯·克里斯蒂安·厄斯泰兹（1777—1851），他发现了通电的电线可以对磁铁产生作用力。麦克斯韦对法拉第的场线产生了极大的兴趣，这些场线是电荷、磁极和周围的电流所释放的。经过多年的努力，他终于推导出一组公式，充分描述了法拉第创造性地提出的场的特性，并因此将两个相对独立的领域电学和磁学统一为一门学科：电磁学。

在将关注焦点集中于电磁现象之前，麦克斯韦曾经对彩色视觉和光的特性一度着迷。（他在 1861 年做出了第一张彩色照片。）那时人们已经不再像牛顿那样，将光看作是一束微粒流了，而是已经认识到光是一种波动现象，光的波动性是克里斯蒂安·惠更斯第一个提出的。这其中有两个试验起到了决定性的作用。第一个是英国物理学家托马斯·杨（1773—1829）在 1801 年发现的干涉现象。

当两列波叠加的时候，它们会互相干涉，也就是说，叠加后的波会依据两列波的相位产生加强或减弱的现象，如图 29 所示。（回忆一下我们在第一章谈论生物钟时所定义的相位概念。在图 29 的第二幅图上，两列波是完全同相的，而在第一幅图上，两者的相位则相差 180°。）杨将从一个小孔射出的单色光透过两个紧密相连的缝隙，同时在缝隙后面放一块屏幕，结果发现在屏幕上形成的图像并不仅仅是两条缝

隙的影像，同时还有一个由明暗不同的线组成的图案。杨将此图案解释为从两个不同的源头发出的光因交替性的相长干涉和相消干涉所产生的干涉条纹。两列波的相对相位取决于两条缝隙到屏幕上给定点的距离：当两列从缝隙发出的同相波在屏幕上相遇时，穿越距离较长的一列波的波相会位于另一列波的后面，在屏幕上呈现的则是两列波的叠加。任何一束细小的微粒都不会产生这样的图像。从那以后，杨的演示实验就成为了证明光具有波动性的最强有力的证据。

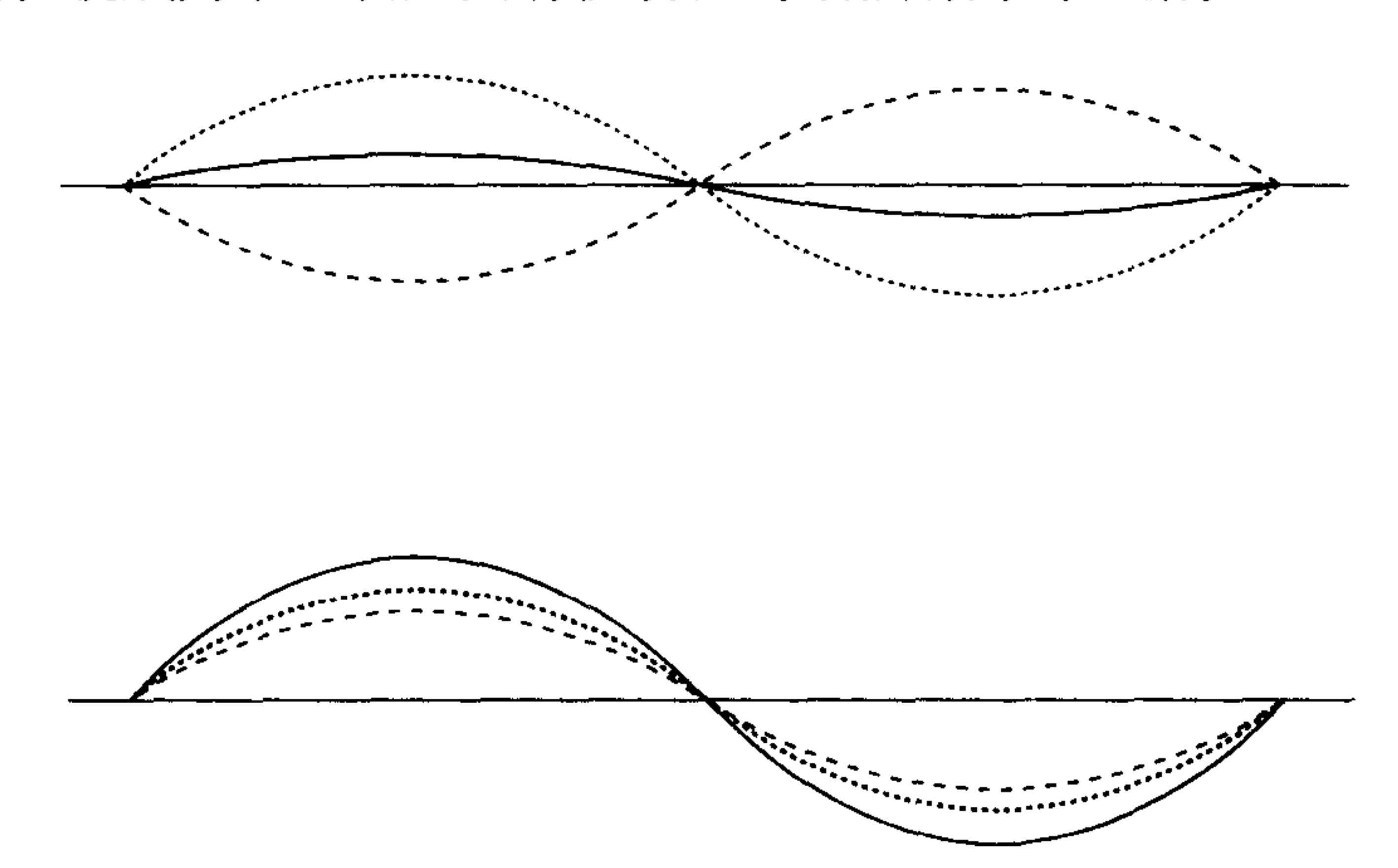


图29　波长相等的两列波的干涉现象。下图为相长干涉，上图为相消干涉。在两幅图中，均以实线表示两列波叠加后的曲线。

第二个实验测量了水中的光速，并将其与空气中的光速进行了对比。牛顿的颗粒说曾预测光在水中会比在空气中传播得快一些，而波动说预言光在水中传播的速度要慢得多。以前对光速的测量都是通过天文学方法进行的，1850 年，傅科和法国物理学家斐索（1819—1896）分别凭借自己天才的创意，在实验室里独立测出了光在水中和空气中的传播速度，他们的测量结果显然与牛顿的预测不同：光在水中要比在空

气中传播得慢很多。(光在空气中或者真空中传播的速度大概为每秒30万公里，这也是为什么光速很难测量的原因所在。) 虽然这些实验的目的也在于验证光的波动性理论，但其说服力还无法与杨的干涉实验相提并论。

因此，当一度被光的特性所吸引的麦克斯韦转而将关注的焦点转向电学和磁学的时候，人们已经普遍认识到光是由一系列波组成的，而且光在真空中的传播速度c也已经被非常精确地测量出来了。不过，这些组成光的波到底是什么样的波呢？声音也被认为是一种波动现象，是由空气的压缩和膨胀造成的。由于光的存在并不需要任何已知的介质，所以人们设想了这样一种介质，并将其命名为以太：这是一种没有质量、无法看到、普遍存在而且穿透力极强的物质，波就是在这种介质里传播并形成光的。(表示“以太”的单词et h er曾经是亚里士多德对笼罩在地球上空的第五种元素的命名。) 我们知道，光波与声波并不相同，前者是一种横波，就像振动的琴弦产生的波动一样，光波的运动方向与振动方向垂直。(而声波是一种纵波。) 法拉第发现，可以通过一个磁场的作用使这个振荡平面的方向（称为光的偏振）产生旋转。这意味着光和磁学也有着密切的关系。此外,数字c（光在真空中的传播速度）成为了安培定律和法拉第定律（两者都将通电线圈与穿过线圈的磁场联系在一起）中的一个数字系数。因此,麦克斯韦期望能够发现光与电磁场是紧密相关的,他试图通过数学的方法描述电场和磁场的物理性质。

麦克斯韦为以太的结构精心制作了一个机械模型，借助此模型，他最终成功地得出了一组方程，完成了对这两种场——此后统称为“电磁场”——的特点的数学描述。1873年,麦克斯韦在专著《电磁通论》中发表了自己的研究成果。

虽然他用以支撑以太结构的机械模型很快就被当作无用之物报废了，但作为一种通过实验方法严密验证的理论，他写出的方程却经受住了时间的考验，流传至今。现在，让我们回到本书的主题上来。

将麦克斯韦的公式代入傅立叶的分析之中，我们会发现对于谐振荡的任何给定频率 f，波长 $L=c/f$ 都会有多个正弦解。换句话说，麦克斯韦方程预示着普遍存在的大气中也存在谐振——可以说这也是一种普遍存在的伽利略钟摆似的振动。那些频率在 $0.5-0.7\times10^{9}$ 兆赫（5—7 亿兆赫），或者波长在 400—700 纳米（1 纳米等于 1 米的十亿分之一）的振动就是我们用肉眼可以看到的光，光的颜色则取决于波长或振动频率。我们现在知道，那些频率更低一些，或者波长为几厘米甚至几米的振动——德国物理学家赫兹（1857—1894）在 1890 年通过实验发现了这种振动——产生的就是无线电波；而在较晚些时候发现的波长更短的振动则是 x 射线和伽玛射线。

基于麦克斯韦的伟大成就，我们现在可以利用谐振电磁波的频率来确定时间标准，而这些标准可以使异地之间方便地实现通信。假设登陆火星后的宇航员发现自己的电子表失灵了，只要简单地发出一个已知频率的电磁波信号，就可以从地球上对其走动速率——电子表上一秒的时间长度——进行重置了。另外，也可以通过一个电磁波信号将其调整为与格林尼治标准时间同步——结果是当格林尼治天文台是中午的时候，该电子表的时间就会显示为中午 12 点整。（由于光从一个星球传播到另外一个星球的时间不能忽略不计——太阳光到达地球大概需要八分钟——所以上述时间调整过程需要分两步进行：首先，从地球发出一个光信号，到达火星后，

该信号立即被反射回地球；从发出信号到再次收到该信号的延迟时间可以让我们推出光信号的单程传播时间。当中午从格林尼治发出的信号到达火星时，火星上的时钟显示的时间将会是中午12点外加所发射光信号的传播时间。)

然而，也有一点美中不足的地方，那就是被假定存在的以太。虽然麦克斯韦所精心制作的以太结构模型已经被报废了，但人们仍然认为以太中是基于某种形式普遍存在的。美国物理学家艾伯特·A. 迈克耳孙（1852—1931）和爱德华·W. 莫利（1838—1923）曾经做了一个非常著名的实验，试图通过确定地球在以太的运动速度从而确定以太的存在。他们的方法与测定潜艇在水中的移动速度一样：假定潜艇的长度为 L，从潜艇的一端发出一个声音信号，通过测量信号达到潜艇另一端的时间 T 可以推算出潜艇的移动速度 s。由于声音在海水中的传播速度是固定的，已知为 S，那么信号从船尾到船首所需的时间应为 $T_1 = L/(S + s)$，而从船首到船尾所需的时间为 $T_2 = L/(S - s)$，因此，从 $T_1 - T_2 = 2Ls$ 中我们很容易计算出 s。迈克耳孙和莫利试图采取类似的方式计算出我们在大气中的运动速度。光在大气中的传播速度是固定的，已知为 c，通过在不同的方向上（与潜艇不同，我们并不清楚自己在大气中的运动方向）仔细测量光的传播速度（因为预想中地球运动速度要远远低于光速），两人试图找出速度发生了多大的变化。实验的结果出乎他们的意料，也让他们大为失望，因为他们根本就没有发现任何变化。那么，这是为什么呢？

年轻的德国物理学家爱因斯坦解开了这个疑团，他的解决方案对时间的测量方法和时钟的计时方法带来了革命性的影响。1879年，爱因斯坦生于德国的乌尔姆，他的父亲

是一个并不成功的商人。举家迁到慕尼黑之后，爱因斯坦进入该市的学校接受教育。由于对学校严格的纪律颇有不满，爱因斯坦在班上的表现并不是很理想。不过一段时间之后，他还是考入了苏黎世工学院。1900 年大学毕业后，爱因斯坦



图30　爱因斯坦在伯尔尼专利局

进入一所高中教书，一年后，他在位于伯尔尼的瑞士专利局谋到了一个专利审核员的职位（这也同时让他成为了一名瑞士公民）。其间爱因斯坦也走进了婚姻的殿堂，不过 16 年后，这段姻缘非常不幸地走到了尽头。

虽然只能在自己的空闲时间从事物理研究，爱因斯坦

还是成功地在1905年——现在我们称之为“爱因斯坦奇迹年”——发表了三篇划时代的论文。第一篇是关于光电效应的诠释，八年前赫兹发现了这种现象，而德国物理学家勒纳德（1862—1947）发现了该现象奇异的特性，其后所有试图解释这种现象的努力和尝试都失败了。爱因斯坦的这篇论文还埋下了量子论的种子。第二篇论文诠释了布朗运动，这是液体中的微小颗粒的一种不规则运动，在显微镜下清晰可见，这种运动第一次直观地验证了物质是由分子组成的。这篇论文为爱因斯坦从苏黎世大学赢得了一个哲学博士的学位（当时的苏黎世工学院还不能授予博士学位）。爱因斯坦在1905年发表的第三篇论文包含了狭义相对论，这种理论对时间和空间的本质提供了一种全新的诠释。

虽然这些论文起初并不被大多数人所理解，而且也没有获得多少赞誉，但却让爱因斯坦在1909年获得了苏黎世大学的一个副教授职位。1911年，他成为了布拉格大学的正式教授。1914年，他最终被任命为皇家物理研究所所长。1915年，爱因斯坦发表了他自己的万有引力理论——广义相对论，该理论与牛顿的万有引力理论有所不同，它预测说太阳的引力会让星星发出的光产生弯曲。1919年，英国天文学家阿瑟·埃丁顿为了验证这种假设专程去非洲做了一次科学远征，当时第一次世界大战的烈火正处于熊熊燃烧的阶段。他在一次日食发生时确认了依据爱因斯坦的理论计算得出的弯曲度是正确的。爱因斯坦因此成为了闻名世界的科学家。在20世纪20年代，身为犹太人的爱因斯坦被德国纳粹驱逐出境，他是在流亡国外的途中变得声名鹊起的。1933年，希特勒上台后，爱因斯坦放弃了德国国籍，拒绝回到柏林工作，而在普林斯顿大学新设立的高等学术研究所（该研究所在很

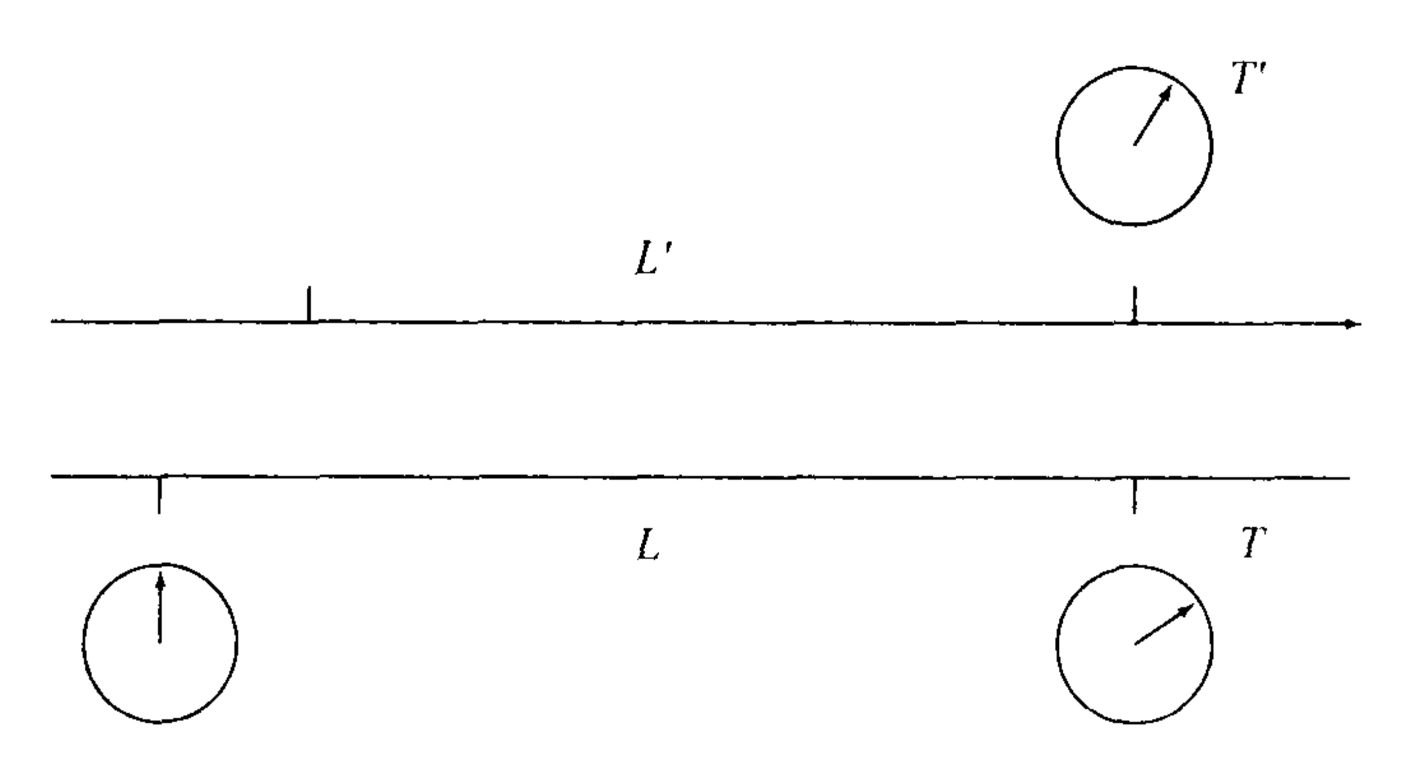
大程度上是专为爱因斯坦设立的）接受了一个终身教授的职位，其后爱因斯坦一直都在高等学术研究所工作，直到1955年逝世。

狭义相对论有一个最核心的假设：对于所有的观察者来说，真空中的光速都是相同的。虽然这一点也体现了迈克耳孙－莫利实验的结果，但据爱因斯坦后来回忆，这种假设根源于他从年轻时代开始的一次思想之旅，他当时曾设想如果自己能够骑在光波的背上，将会看到一个什么样的世界呢？这无疑需要彻底颠覆人们此前对于空间和时间本质的认识：如果你能够以接近光速 c 的速度 s 追踪一个光信号，你怎么还可能看到以同样的速度 c 前行的该信号的运动呢？

为了解开这个谜团，爱因斯坦从自己的头脑里彻底清除了所有先入为主的想法，转而从最底层的假设开始一次新的思想旅行：在进行物理测量——物理学家称其为坐标系统——的所有实验室里，时间是由时钟定义的，而距离由码尺测定。假设最理想的坐标系统是由标有距离标志的一个个小格子和均匀分布的同步原子钟组成的，可以保证每一次的物理测量都是绝对可靠的。（原子钟确实可以做到以完全相同的速率计时，彼此发出的光信号也可以确保所有的时钟保持同步。）因此，对于相对独立的两个坐标系统而言，时间和距离测量的基础也是完全独立的——没有什么“上帝的时间”，只有时钟测量的时间。

舞台已经搭好了，我们将在两个不同的实验室里拉开测量大戏的幕布，并将两处的结果进行比较。如图31所示，观察者处于静止状态，在时间为o时向右侧发射一个光信号，当右侧的另一台时钟转动到时间 T 时，该信号已经向右移动了一段距离 L，到达一个特定的点。另外一个观察者也从时

间 o 开始向右发射一个光信号，同时他以速度 s 向右移动，当到达同一地点时，他发现位于右侧的时钟指示的时间为 T'。同时，由于第二名观察者一直处于运动状态，所以第二个信号发出时的地点已经有了一些变化，所以信号移动的距离也相应地变为了 L'，小于距离 L。凭直觉，我们会认为 T' 肯定与 T 完全相同——移动的观察者所持有的所有时钟都是同步的，而且也与静止的观察者持有的时钟同步，换句话说，所有的时钟都是同步的。由于 $L'= L - Ts$，而且移动的观察者所看到的光信号的速度为 $c'= L'/T$，所以我们可以计算出 $c'= (L/T) - s = c - s$。然而，爱因斯坦坚持说 $c'=c$，因为对于所有的观察者来说，光速都是相同的。只有当 $T'= L'/c$ 时，才会得出 $c'=c$ 的结论，这就意味着 T' 小于 T。（在爱因斯坦那无比锋利的解剖刀下，光造成了以太这种介质的振动并以速度 c 在其中传播的概念成为了牺牲品，而且毫无疑问只能被抛弃了。）换句话说，在静止的观察者看来，移动时钟的转动变慢了。事情还远不止如此，越往右走，被设定为同步的一



Ⓐ 图31 下面的图片显示的是静止的观察者的时钟，分别位于光信号发射的起点和达到的指定点。上面的图片显示的是移动的观察者的时钟，位于光信号到达的指定点。

系列移动时钟与第二位观察者经过的静止时钟之间的差距就会越来越大（这是因为距离 L 越长，L' 与 L 的差距就会越大）。当然，这就意味着从静止的观察者的角度来看，移动的时钟就不同步了。当在处于移动状态的坐标体系下测量时，被认为在同一坐标体系下会同步发生的两件事情变得不再同步了。

随便提一下，两位观察者所处的情境完全是对称的：与排列在轨道上的一系列同步时钟相比，在移动的火车机车上所携带的时钟看起来会转动得越来越慢；而在列车长看来，与每一节车厢设定的同步时钟相比，车站的时钟会变得越来越慢。因此，列车长会得出结论说：车站的时钟慢了，而站长会得出结论说：机车上的时钟慢了。（至于机车上的时钟为什么会比轨道上的时钟慢，而且越来越慢，火车司机的解释是：轨道上的时钟不同步；而站长对于他的时钟看起来比火车上的时钟慢了，而且越来越慢的解释则是：火车上的时钟没能做到完全同步。）

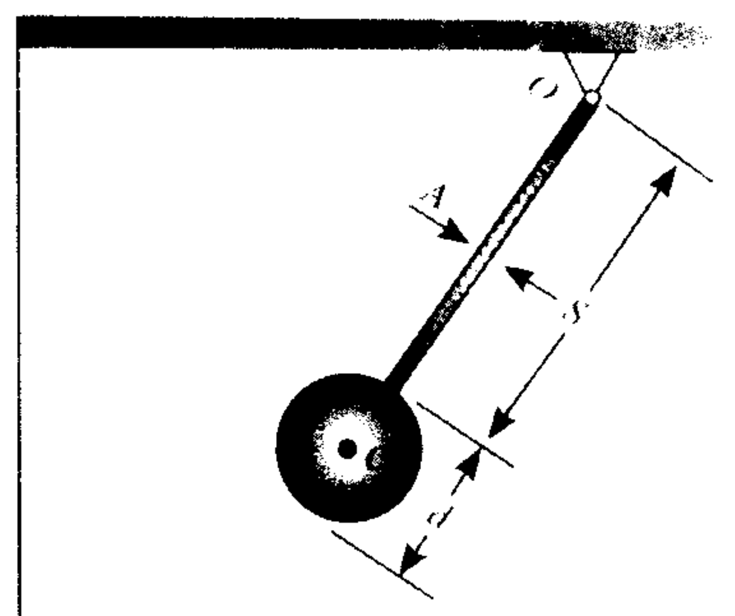
如果你发现相对论的这些结果让人大为震惊，你可不是唯一有这种感觉的人；直到今天，《数学物理学杂志》——我是该杂志的编辑——偶尔还能看到读者投稿的论文，论文的作者们声称要证明爱因斯坦肯定是大错特错了。然而，这种理论所蕴含的假设和预言已经被在 20 世纪进行的大量实验证明是正确的，而且准确度很高。你可能会问，为什么以前就没有人注意到这些奇怪的效应呢？原因很简单，只要移动的速度远远小于光速，这些效应的影响就实在是太小了，而且很难测量。而光速又高达每秒 30 万公里，与我们生活中的任何速度相比较，两者之间的差距都会是一个天文数字。在正常的情况下，相对论效应的影响会非常非常微弱，以至于我们很难察觉这种效应的存在，更不要说去测量这种效应

了，除非我们有一些精确度超乎想象的装置。

那么，如果相对论是正确的，我们那美妙而稳定的振荡时钟又被摆在了什么位置呢？对于牛顿来说，时间和空间都是完完全全的实际存在，是上帝所赋予的，而且依照牛顿的力学定律，时间的流逝是由简单钟摆或其他基于类似原理的振荡器所定义的，这种流逝是普遍存在的，而且对于所有的观察者来说都是同样有效的。然而，依据相对论，两台存在相对运动的铯原子钟都会被彼此认为走慢了。事实上，如果让其中的一台绕地球飞行，当再次着陆的时候，它会被留在地球上的那一台时钟甩在后面了——真的有人在一架绕地飞行的飞机上做了这个实验，实验结果验证了上述预测的正确性。这种现象也被称为"相对论孪生佯谬"：如果让双胞胎中的一个进行一次高速的长距离太空旅行，而让另一个留在地球上，那么当前者回到地面的时候，会发现他比自己留在地球上的孪生手足年轻了一些。两者之间的对称性被一个事实打破了：飞行的时钟必然是被加速了。即便是用最好的振荡器计时装置在宇宙中的两点以通用的速率记录时间的流逝，只要两者之间存在相对运动，它们就不可能永远做到完全同步。（另外，广义相对论还暗示：强烈的重力场也会对它们的运转速度产生影响。）

如果爱因斯坦的某些观点带来了简谐振动与时间流逝之间关系的根本性变化，那么他的其他更具洞察力的见识会使人们了解最终这些简谐振动所扮演的一个崭新角色——它们正是构成物质的基础。就这一点而言，伽利略的钟摆虽然带来了很多重要的结果，但也只能作为时间调整器存在。正如我们将在下一章看到的，现在，钟摆将在宇宙中扮演更为基础的角色了。

第八章



量子：
组成粒子的谐振子

为了充分理解伽利略的简谐振动在20世纪的物理学中将要扮演的最基础性的新角色，我们必须做一些简短的回顾。

赫兹在1897年发现了光电效应，悄悄地在物理学和很多重要的技术应用领域引发了一场革命。赫兹证明了当把光投射到金属表面时，后者会释放出电子；如果金属与电路相连，这些电子就会形成电流。五年后，勒纳德发现这种光电效应有一个非常奇怪的特性：虽然电子的数量会随着光的亮度增强而增加，但电子的移动速度却只取决于光的颜色（波长越短，电子移动得越快）。而直觉和经典物理学都会让我们产生这样的推测：更强的光照不仅能激发更多的电子，还能激发出更快的电子。

在1905年（勒纳德正是在这一年因其发现获得了诺贝尔奖）爱因斯坦的论文发表之前，没有人能够解释这种实验现象，爱因斯坦在他的论文里从理论上给出了解答，但这些理论将撼动物理学的基础。20年后，爱因斯坦所发表的解释性论文的滞后效应开始慢慢呈现，此时，勒纳德已经成为了一个极端的纳粹分子，他发表了很多火药味十足的文章，支持所谓的"德国物理学"，对抗爱因斯坦的"犹太物理学"。

爱因斯坦对于勒纳德发现的解释借助于对其他领域一个新奇思想的重新诠释。马克斯·普朗克（1858—1947），另一位德国物理学家，在没有对光在被物体吸收或发射时的特性作出假设之前，就发现了"黑体"在加热时辐射出电磁波谱的分布规律。（黑体是这样一种物质，它完全吸收落在其身上的所有辐射的能量，而不进行反射。恒星就是这样的炽热发光体，在火中烧得通红的铁块也是；它们的颜色会随着温度的变化而变化。）通过对光在被物体发射或吸收时的特

性做出假设，爱因斯坦解释了在火中烧得通红的铁块和天空中的恒星的颜色为什么会变化。但他不能解释实验数据，除非他这样假定：发射或吸收光的振动分子能量总是局限在一些离散值中，与光的频率成一定比率，而这种假定与经典理论背道而驰。这个比率后来被称作普朗克常数，通常用“h”来表示。

基于这种新思路，爱因斯坦比普朗克更进一步对光电效应进行了深入的解释：频率为 f 的光总是以能量为 hf 的量子的形式出现，而不是像普朗克所假定的那样，仅仅在光被发射或吸收的时候。自从杨做过干涉实验后，光是由波组成的这一观点已经被普遍接受。在没有否认杨的干涉条纹的说服力的前提下，爱因斯坦勇敢地提出了备受怀疑的牛顿微粒学的一个新版本。在他看来，光具有波粒二象性。其中的粒子最终被称为了光子。如果这种混合理论看起来有点违背直觉，那么爱因斯坦关于运动时钟变慢的观点就更是如此了。爱因斯坦关于光的本性的理论甚至要比狭义相对论还有着更为深远的意义。事实上，在 1905 年发表的所有论文中，爱因斯坦本人认为关于光电效应的论文是其中唯一真正具有划时代意义的。

很多实验发现都不能用经典物理学理论做出解释，这就导致了一种中间理论的出现，它将经典物理学的理论片段与量子概念勉强结合在一起。到了 20 世纪 20 年代，一种崭新的理论终于诞生了，它后来演变成为所谓的“量子力学”。这种理论得到了丹麦科学家尼尔斯·玻尔（1885—1962）的支持和鼓励，玻尔本人就因对原始量子理论做出的重大贡献而闻名遐迩。量子力学的核心架构是由三位科学家完成的：德国人海森堡、奥地利人薛定谔和英国人狄喇克。虽然老前

辈爱因斯坦对晚辈们的这个鲁莽创意的哲学内涵不太满意，但他的反对声很快就被新理论与大量快速涌现的实验结果相吻合的大潮给淹没了。毫无疑问，新理论取得了压倒性的胜利。

薛定谔于 1887 年出生在维也纳，他的父亲是一名制造商。薛定谔是在当地的高级中学接受的教育，他特别喜欢古文、数学和物理学。薛定谔在维也纳大学获得了物理学博士学位。在第一次世界大战期间，他参加了奥地利军队并成为了一名炮兵指挥官。随后他到了德国，1921 年到了瑞士，在



图32　薛定谔在1946年左右的照片

那里他成为了苏黎世的一名物理学教授。基于他在新兴的波动力学上取得的成绩，薛定谔继普朗克之后，于 1927 年成为了柏林的理论物理学教授，并一直在该岗位上待到 1933 年希特勒上台。其后的三年他在牛津大学迈德格林学院做了一名大学董事。离开后他回到了奥地利并在格拉茨谋到了一个职位，并一直呆到 1938 年德国吞并奥地利。鉴于当时的情况，薛定谔离开了奥地利，成为了爱尔兰都柏林高级研究院的一名资深教授。1956 年，薛定谔的健康状况已经不容乐观了，他回到了维也纳大学，并受到了家乡人民的热烈欢迎。1961 年，薛定谔在家乡走完了生命中的最后五个年头。

海森堡比薛定谔小 14 岁，于 1901 年出生于德国维尔茨堡。海森堡的父亲是一名语言学教授，他是家里最小的男孩子。海森堡在学校的时候就展露出非凡的数学天赋（在钢琴演奏上也颇有禀赋），长大后考入了慕尼黑大学攻读理论物理，并于 1923 年取得博士学位。从 1924 年到 1926 年，海森堡一直在哥本哈根与尼尔斯·玻尔共事，随后他被邀担任了莱比锡大学的理论物理学系主任。1941 年，海森堡离开莱比锡大学前往柏林的皇家物理研究所，开始了从事发展核能的指导工作，可能还包括核弹，不过德国在此方面的努力最终遭遇了惨败。对于他在研究核弹中所扮演的角色至今还存在一定的争议。第二次世界大战后，海森堡被任命为哥廷根马克斯·普朗克物理研究院的院长，该研究院于 1958 年迁往慕尼黑。他在该职位上一直待到 1970 年。1976 年，海森堡在慕尼黑逝世。

最基础的物理理论的三个缔造者中，年龄最小是狄喇克，他于 1902 年出生于布里斯托尔，母亲是英国人，父亲是教授法语的瑞士人。狄喇克在布里斯托尔大学读的是数学和哲

学，却获得了一个电机工程的学位。1923 年，他转学到剑桥大学，并于 1926 年在那里完成了哲学博士的论文答辩。狄喇克在欧洲大陆广为游历，并拜会了当时所有的一流物理学家。1927 年，他被选为剑桥大学圣约翰学院的大学董事，并于 1932 年荣幸地成为了剑桥大学的鲁卡荪数学教授。狄喇克是一个沉默寡言的人，但却有着深邃的物理学洞察力，他于 1971 年移居美国，成为了佛罗里达州立大学的物理学教授。1984 年，狄喇克去世。



图33　尼尔斯·玻尔、海森堡和狄喇克在1962年的合影

狄喇克所提出的新理论称为“量子力学”，其实是薛定谔和海森堡在 1925 年几乎同时提出的两种理论的综合体。两种理论分别被称为“波动力学”和“矩阵力学”，但从数学上来说，两者没有什么区别。无论从蕴含的哲学思考还是对实验观察的预测看，量子力学都与之前广泛接受的物理学概念在很多方面有着根本性的不同，而在所有这些问题中，我们最关注的就是物理系统中的能量问题。

当将气体加热到足够高的温度时，就像太阳的温度一样，组成气体的原子会发出光和其他电磁辐射，每一种化学元素都会发出特定颜色的光。让这些光透过一个棱镜，就像牛顿曾经做过的那样，不同频率的光会散射分开，形成象指纹一样、标示不同组成元素特性的光谱线集。这也正是我们分析太阳和遥远恒星化学成分所使用的方法。

就最轻的化学元素氢来说，我们已经知道氢原子仅由一个原子核以及一个质量轻很多的电子组成。通过对氢元素光谱仔细测量，发现了组成频谱的频率遵循一个简单的规律，这种规律描述起来简单，但解释起来比较麻烦。玻尔的巨大贡献就在于提出了一个行星原子模型，原子核就好比是太阳，电子就好比是在特定轨道上围绕太阳旋转的卫星，不同轨道上的电子具有不同的能量，而这种能量的大小遵循某种数学规律。依照玻尔的理论，在高温状态下，高速运动的原子会发生碰撞，将电子抛到高能态轨道——此时原子处于“兴奋”状态——随后再降到低能态的水平。在电子回到其正常的轨道上时，原子会将其多余的能量 E 通过发射一个光子的办法释放掉。依据普朗克的理论，原子会释放出具有频率 $f = E/h$ 的辐射。观察到的频率释放规律，就是控制原子内部电子能级跃迁规律的外在表现（事实上，每一次的发光都源自电子从一个能级向另一个能级的跃迁，普朗克所提出的奇怪的量子就是这个事实的结果）。当原子处于基态时，也就是说，处于最低的能级时，它是绝对稳定的，不会发出任何辐射。

这是一个创意绝佳的模型，但就经典物理学的所有规则来看，该模型都是荒谬的。首先，为什么只有特定轨道是允许的？其次，依据麦克斯韦的电动力学，一个带电粒子，比如电子，在沿着原子核做轨道运动时，肯定会发出电磁辐射，

因此会不断地损失能量，结果就会是电子以螺旋形向中心运动。这样说来，一个原子就只能存在很短的一段时间，随后就“寿终正寝”了。对这些问题，玻尔心知肚明却置之不理，仅仅是提出自己的特别理论，成功地解释了许多复杂的光谱观测现象和原子基态的稳定性。然而，如果你要问为什么要遵循这些规律，我想你不会得到什么答案，就连玻尔也没有提供理解这些规律的相关理论。

薛定谔、海森堡和狄喇克缔造的新“量子力学”提供了这样一个一般性理论，可以使玻尔理论精确地应用于对具体原子的研究之中。在经典物理学描述之下，任何物理系统都具有连续的能量区间，而在“量子化”之后（也就是说，应用于量子力学的一般规则之后），它们的能量只存在频谱范围之外的能量数值。对于不同的系统，能量频谱可能由连续的能量区间或离散的能量区间组成，或者两者兼而有之。而且，完全相同的两个系统（量子力学中称之为全同粒子体系。——译者注）——比如说，两个氢原子——具有相同的能量（而且其他参数的量子系数也完全相同）——是完全不可区分的。（量子力学中称之为全同粒子体系不可区分，这样的全同粒子体系任意交换时，不会造成任何可观测的结果。——译者注）没有任何标记或其他记号允许我们说：“这个原子就是以前在那里看到的那个。”一个处于基态的氢原子就是一个处于基态的氢原子，除此之外，我们没什么好说的。

新的理论带来了数不清的可以证实的预言，也对之前还不能理解的很多数据提供了诠释；它经受住了所有的测试，一路高奏凯歌。爱因斯坦对“量子力学”所描述的“实体”本质有过哲学上的担忧。如今，在如此辉煌胜利的重压下，爱因斯坦也只能把自己的担心抛诸脑后了。

那么，该理论是如何应用到谐振子上的呢？如果将牛顿关于简单钟摆的运动方程“量子化”，也就是说，遵循新的规则，那么它的全部能量频谱将会由无穷多的不连续的点组成（我们在观察老爷钟或者非常精确的石英钟时并没有留意到这一点，原因就在于不同容许能级的间距特别微小）。而且这些允许的能级之间量差相等，像阶梯一样。这种能级的等距性是一个很不寻常的特点，我们将会看到，蕴含在这种等距性背后的物理学内涵肯定会远远超出摆动的挂灯和航海天文钟的应用。

1925 年过后不久，德国物理学家帕斯库尔·约当和狄喇克就开始思索场论在新的量子王国中的命运了，他们特别关注的是麦克斯韦方程组。将这些电磁场方程量子化首先要借助于傅立叶分析（就像第七章讨论的那样），将这些方程组看作是无数组件叠加的物理系统，每个组件具有一个特定频率，就像麦克斯韦发现的一样，每个这样的组件都像是一个谐振子：这就是该方程组如何描述光波存在的方式所在。

另一方面，在这些谐振子上应用量子规则，则会导出与每个频率对应的无数离散能级的出现，并且与这些谐振子允许能级对应，能级间的量差是一样的。从第五级跃迁到第六级与从第十级跃迁到第十一级所需的能量是一样的。这些量子化的方程组很自然地成为描述离散能量包存在的工具，而这种能量包由同样大小的能量单元组成——即光子：当频率为 f 的谐振子处于基态时，没有光子。当它跃迁到第二能级时，会出现一个能量为 hf 的光子。当它处于第六能级时，会出现五个光子，以此类推。而且，后来证明光子理论与相对论中有关零质量光速运动微粒能量和动量关系的判断非常吻合：这些粒子的能量等于动量乘以光速 c。因此，如果从

经典物理学的角度出发，借助麦克斯韦方程描述谐振子的话，结果会引出光的波动性；而如果以量子化方法描述同样的谐振子，就能得出结论：光是由爱因斯坦提出的光子组成的。

电磁效应是第一种作为场的交互作用，最初从经典物理学的角度描述，大约70年后，换成从量子力学角度描述。狄喇克最大的贡献就是迈出了模拟电子的关键一步。所有这些粒子都会携带相同数量的电荷和一个固有的角动量。美国物理学家罗伯特·安德鲁·密立肯（1868—1953）于1913年测出了粒子所携带电荷的数量；角动量也被称为“自旋”，仿佛粒子在不停地围绕一个自转轴旋转，这让它同时变成了一个小磁铁。粒子的“自旋”虽然在1925年就被发现了，但却只以特殊的方式增加到其量子描述中。这是因为缺少一个描述电子状态的量子力学方程，该方程必须考虑到一个事实：在很多实验室环境下，电子在原子内部会以接近光速的速度运动。因此这个方程应当满足狭义相对论的要求，薛定谔先前提出了一个方程，而海森堡没有。薛定谔试图完成这个艰巨的任务，但他提出的相对论方程并不能正确地解释原子光谱的实验观测现象。

狄喇克在1928年提出的方程宛如一件艺术品，完全是基于美学的立场所创造的——当然，也会受到已知物理定律和数学规则的约束。狄喇克毫不掩饰地承认自己在很大程度上从审美标准里得到了灵感，他获得了非凡的成功：物理学家们普遍认为他的方程充溢着显而易见的美感。然而，它还不仅仅是一个美丽的艺术品，可以让人充满敬意地写下来并盯着它慢慢欣赏；它同时还具有应用价值。该方程不仅对氢原子光谱的细微之处做出了预测，而且还自然地准确描述出了电子的自旋。事实上，如果从谐振子的角度出发，该方程

所取得的成就甚至还要更多。

虽然狄喇克最初并没有从这个角度看待自己的方程，但毫无疑问，就像薛定谔方程一样，他的方程最终将会被用于指导量子领域，而不是一个波动函数。狄喇克方程和麦克斯韦方程组类似，都能很方便地用傅立叶分析进行变换，并因而被转化为一组谐振方程。当“量子化”的时候，这些方程将会引出一些与光类似的结果：振荡子能级的等距性显然意味着粒子的存在：不过这次粒子的存在形式是电子，它符合相对论中质量 m 的粒子能量与动量之间的正确关系，具备正确的自旋和携带特定的电荷 $-e$。(在一次偶然的历史事件中，人们发现了电子携带负电荷。)

然而，比较神奇的是，狄喇克方程不仅可以用来描述质量 m 和电荷 $-e$ 的粒子；而且还可以用来描述同样的质量 m 和电荷 $+e$ 的粒子——虽然当时还不知道有这种物质存在。花了好长时间，这种物质才被发现。1932 年，美国物理学家卡尔 · 大卫 · 安德森（1905—1991）通过实验确认了正电子的存在。可以说，狄喇克的完美方程取得了辉煌的三连胜佳绩：它符合狭义相对论的条件；它描述了电子在自然状态下的自旋（它甚至还包括了电子磁特性描述，不过略有偏差）；它还预言了电子反粒子的存在。

麦克斯韦方程组和狄喇克方程都是描述量子场的方程组——狄喇克方程是关于引发电磁场的电荷的，而麦斯韦尔方程组是关于造成对电荷产生作用的电磁场的，两者的结合造就了非常成功的量子电动力学理论，缩写为 QED，该理论在其后的 20 年里逐渐发展成熟。第二次世界大战结束后，美国物理学家朱利安 · 施温格（1918—1994）、理查德 · 费曼（1918—1988）和日本物理学家朝永振一郎为量子电动力

学理论的发展做出了新的卓越贡献，与实验结果相比，得出的理论数据达到了令人吃惊的精确程度。

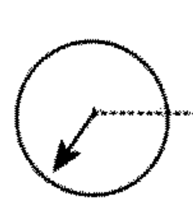
与薛定谔的粒子方程相比，这些场方程描述的是：只要施加足够多的能重，就可以按照意愿产生或毁灭无数的量子——甚至在能量不足的情况下，创造短时间内量子的生存——这些现象遵循电荷守恒定律。事实上，建造出能够产生高能粒子碰撞束的强大加速器后，正负电子对的产生现象就可以通过实验的方法在实验室里观察到了。量子电动力学理论还预测出了对原子光谱造成细微改变的微弱效应，以及电子的某些特性的细微改变，比如电子的磁性（由此就可以解释为什么狄喇克方程所预测的电子磁性会与通过实验测量得出的数值存在细微的偏差了）。所有这些预测都可以依据量子电动力学理论计算出非常精确的数据；经实验验证，在某些情况下，这些数据的偏差仅为十亿分之一。

在 20 世纪后半期，出现了很多基于 QED 模型的其他量子场理论，不过到目前为止，这些理论在可靠的理论计算数据和高度精准的实验数据方面还没有取得太大的成功。因此，我们现在认为宇宙中的所有物质都是由不同场的量子组成的，量子间所有作用力的效果——重力是其中唯一的例外，其量子特性目前还不为我们所知——成为各种场的外在表现形式，这些场本身也会产生自己的量子。从本质上来说，所有这些量子都源自同一种数学机理，也就是谐振子的量子化，谐振子的能级会等差分布，从而得出粒子存在的结论。

同样的理论也可用于声音这种我们听得见的振动：这种振动同样受到量子规则的约束，因此也被发现是由粒子组成的，这种粒子被称为“声子”（由于声音的频率要比光的频率低很多，依据普朗克方程 $E = hf$ 我们能够知道单个声子的

能量要比光子的能量小很多。）此外，当前还有一些非常流行的理论和推测，都是有关被期待已久的爱因斯坦广义相对论和量子论之间的和谐共处的。由于这些理论形式多样，所以被称为超弦理论；超弦理论将伽利略简单钟摆的特性作为基本元素，就像是竖琴的琴弦在一个更高维数空间的振动。

晃动的钟摆引领着我们走过了一段漫长而曲折的历程。我们在起点目睹了许多稳定可靠的时钟，正是靠它们对时间的调整，我们的日常生活才有了节奏，变得秩序井然。随后我们体验了变化多端的振动，琴弦、鼓膜、长笛、管风琴，正是这些振动为我们带来了美妙悦耳的音乐；我们还在接下来的旅程中看到了光波的干涉条纹。我们随着爱因斯坦的光子和狄喇克的电子到达了这次旅行的终点，并终于明白了是什么构成了大千世界。虽然看起来错综复杂，难以亲近，但绝大部分的科学家都有一个指导性的信念：大自然终将会自己揭开神秘的面纱，展示出她简单且相互关联的一面；如果不是这样，我们哪里还有什么机会去窥探她神秘莫测的内心世界呢？年轻的伽利略在不经意间发现了谐振子的等时性，他可能永远也不会想到，等间隔性系统竟然成为了这个世界上无所不在的、最本质的物理体系，并在我们探索自然的伟大工程中成为一块关键的基石。



注释

第一章 生理计时：身体的节律

1. 有关该同步现象的数学描述，请参考 S.H. 斯特罗加茨和 I. 斯图尔特 1993 年 12 月发表于《科学美国人》的文章“耦合振荡器和生理学同步性”，第 102—109 页。也可以参考 S.H. 斯特罗加茨的著作《同步性：自发顺序科学的形成》（纽约：Theia 出版社，2003 年）。
2. 有关生物钟周期属性的数学分支讨论，请参考 A.T. 温弗瑞的著作《生物学时间的几何学》（第二版）（纽约：斯普林格出版社，2001 年）。
3. I.普鲁温斯奥等人，《自然》（第415期，2003年1月31日）第493页；S.黑塔尔等人，《自然》（第295期，2002年2月8日）第1065页；D.M.博森等人，《自然》（第295期，2002年2月8日）第1070页和第955页；还可以参考M.梅内克，《自然》（第299期，2003年1月10日）第213页。
4. 有关视交叉上核近期研究成果的回顾，请参考 S.M. 里珀特和 D.R. 韦弗发表于《自然》（第 418 期，2002 年 8 月 29 日）第 935—941 页的文章：“哺乳动物体内昼夜节律系统的协调作用”。
5. 有关脉孢菌昼夜节律生物钟的近期研究成果，请参考克雷默等人发表于《自然》（第 421 期，2003 年 2 月 27 日）第 948—952 页的文章。
6. 有关如何在家里通过化学实验得出类似结果的说明，请参考让·沃克发表于1978年7月出版的《科学美国人》“业余科学家”专栏第152—158页的文章。

第二章 历法：迥异的鼓手

1. 最近有人推测史前巨石柱是女性生殖器的象征，如果此推测属实，那么其建造的真实目的肯定就会与此大相径庭了。

2. 据《圣经》记载，耶稣被钉死在十字架上三天后复活了，当时逾越节刚好结束，因此说复活节的庆祝日期是由犹太历法所规定的。依据犹太历法，逾越节的时间应该是太阴月的第14天，也就是春分或者春分后的某一天。

第三章　早期的钟表：家庭作坊式的节拍

1. 引自R.伯林格姆的著作《时钟独裁者：计时上下五千年》第63页（纽约：麦克米伦出版集团，1966年）。

第四章　摆钟：大自然的韵律

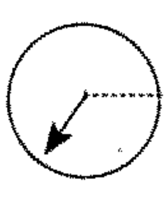
1. 伽利略发明的望远镜在航海上的用途并没有被忽略，曾经大权在握的海军大腕威尼斯就承诺在自己的大学里为伽利略提供一个终身职位，不过伽利略拒绝了他的好意，转而选择了托斯卡纳。

第五章　后继者：无所不在的守时性

1. 在月球重力场的影响下，地球的自转会逐渐地变缓，因此原子钟定义的时间会比“公认的标准时间”稍微提前一些，后者是全世界所有的时钟用以参照的标准时间，它假定太阳的表面是平滑的而且地球的转动是平稳的。为了理顺两者之间的关系，从1972年开始，国际电信联盟会偶尔为后者置入一些“闰秒”，到目前为止，其总长度已经达到了32秒。然而，这种做法最近引起了争议，请参考《自然》（第423期，2003年6月12日）第671页的文章“在关于时间的争论中，天文学家跳出来积极捍卫额外的几秒钟”。

第六章　牛顿：钟摆的物理学原理

1. 引自一位女士——也是牛顿儿时的小伙伴——所说的话，记载于理查德·S.韦斯特福尔的著作《艾萨克·牛顿的一生》第13页（剑桥：剑桥大学出版社，1993年）。



参考文献

Audoin, Claude, and Bernard Guinot. *The Measurement of Time: Time, Frequency, and the Atomic Clock.* Cambridge: Cambridge University Press, 2001.

Barinaga, M. "New timepiece has a familiar ring." *Science* 281 (4 September 1998): 1429–1430.

Bedini, Silvio A. *The Pulse of Time.* Florence, Italy: Leo S. Olschki, 1991.

Berson, D.M., et al., "Phototransduction by retinal ganglion cells that set the circadian clock," *Science* 295 (8 February 2002): 1070–1073.

Brady, John, ed. *Biological Timekeeping.* Cambridge: Cambridge University Press, 1982.

Brearly, Harry C. *Time Telling through the Ages.* New York: Doubleday, Page & Co, 1919.

Breasted, James Henry. "The beginnings of time-measurement and the origins of our calendar." In *Time and Its Mysteries,* series I. New York: New York University Press, 1936, pp. 59–94.

Buijs, R. M., et al., eds. *Hypothalamic Integration of Circadian Rhythms.* Progress in Brain Research, vol. 111. Amsterdam: Elsevier, 1996.

Bünning, Erwin. *The Physiological Clock: Circadian Rhythms and Biological Chronemetry,* 3rd ed. New York: Springer Verlag, 1973.

Burlingame, Roger. *Dictator Clock: 5000 Years of Telling Time.* New York: Macmillan, 1966.

Cowan, Harrison J. *Time and Its Measurement: From the Stone Age to the Nuclear Age.* Cleveland, World Publishing Co., 1958.

Edmunds, Jr., Leland N. *Cellular and Molecular Bases of Biological Clocks.* New York: Springer-Verlag, 1988.

French, A. P., ed. *Einstein: A Centenary Volume.* Cambridge: Harvard University Press, 1979.

Goldbetter, A. *Biochemical Oscillations and Cellular Rhythms,* 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1997.

——— "A model for circadian oscillations in the *Drosophila* period protein (PER)." *Proceedings of the Royal Society: Biological Sciences* 261 (1995): 319–324.

Golden, S. S., et al. "Cyanobacterial circadian rhythms." *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology* 48 (1997): 327–354.

Gonze, Didier, et al. "Robustness of circadian rhythms with respect to molecular noise." *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 99 (2002): 673–678.

Goudsmit, S. A., and R. Claiborne, eds. *Time.* New York: Time Inc., 1966.

Hattar, S., et al. "Melanopsin containing retinal ganglion cells: architecture, projections, and intrinsic photosensitivity," *Science* 295 (8 February 2002): 1065—1070.

Hendry, John. *James Clerk Maxwell and the Electromagnetic Field.* Bristol: Adam Hilger Ltd, 1986.

Hood, Peter. *How Time Is Measured.* Oxford: Oxford University Press, 1969.

Jacklet, J. W. "Circadian clock mechanisms." In John Brady, ed., *Biological Timekeeping.* Cambridge: Cambridge University Press, 1982, pp. 173–188.

Klarreich, Erica. "Huygens's clocks revisited." *American Scientist* 90 (2002): 322—323.

Klein, D. C., R. Y. Moore, and S. M. Reppert. *Suprachiasmatic Nucleus: The Mind's Clock.* New York: Oxford University Press, 1991.

Kluge, Manfred. "Biochemical rhythms in plants." In John Brady, ed., *Biological Timekeeping.* Cambridge: Cambridge University Press, 1982, pp. 159–172.

Leloup, J.-C., and A. Goldbetter. "Modeling circadian oscillations of the PER and TIM proteins in *Drosophila.*" In Y. Touitou, ed., *Biological Clocks: Mechanisms and Applications.* Amsterdam: Elsevier, 1998, pp. 81–88.

Marcus, G. J. *A Naval History of England: I. The Formative Centuries.* Boston: Little Brown and Company, 1961.

Menaker, M. "Circadian photoreception." *Science* 299 (10 January, 2003): 213–214.

Moore, W. *Schrödinger: Life and Thought.* Cambridge: Cambridge University Press, 1989.

Moore-Ede, M. C., F. M. Sulzman, and C. A. Fuller. *The Clocks That Time Us.* Cambridge: Harvard University Press, 1982.

Needham, Joseph. *Science and Civilization in China.* Cambridge: Cambridge University Press, 1954.

Needham, J., W. Ling, and D. J. de Solla Price. *Heavenly Clockwork.* Cambridge: Cambridge University Press, 1960.

Nilsson, Martin P. *Primitive Time-Reckoning.* Lund: C. W. K. Gleerup, 1920.

Pais, A. *Niels Bohr's Times.* Oxford: Clarendon Press, 1991.

Palmer, John D. *The Living Clock: The Orchestrator of Biological Rhythms.* New York: Oxford University Press, 2002.

Pikovsky, A., M. Rosenblum, and J. Kurths. *Synchronization: A Universal Concept in Nonlinear Science.* New York: Cam-

bridge University Press, 2002.
Reppert, S. M., and D. R. Weaver. "Coordination of circadian timing in mammals." *Nature* 418 (29 August 2002): 935–941.
tude. London: Fourth Estate Ltd, 1998.
Strogatz, Steven, and Ian Stewart. "Coupled oscillators and biological synchronization." *Scientific American,* December 1993, pp. 102–109.
Takahashi, J. S. "The biological clock: it's all in the genes." In R. M. Buijs et al., eds., *Hypothalamic Integration of Circadian Rhythms.* Progress in Brain Research, vol. 111. Amsterdam: Elsevier, 1996, pp. 5–9.
Thomas, John M. *Michael Faraday and the Royal Institution.* Bristol: Adam Hilger Ltd, 1991.
Touitou, Y., ed. *Biological Clocks: Mechanisms and Applications.* Amsterdam: Elsevier, 1998.
Watson, F. R. *Sound.* New York: John Wiley & Sons, 1935.
Westfall, Richard S. *Never at Rest.* Cambridge: Cambridge University Press, 1980.
——— *The Life of Isaac Newton.* Cambridge: Cambridge University Press, 1993.
Wever, Rütger A. *The Circadian System of Man: Results of Experiments under Temporal Isolation.* New York: Springer Verlag, 1979.
Winfree, Arthur T. *The Geometry of Biological Time,* 2nd ed. New York: Springer Verlag, 2001.
——— *The Timing of Biological Clocks.* New York: Scientific American Library, 1987.

Galileo's Pendulum

From the Rhythm of Time to the Making of Matter



从生物体到原子钟，一系列测量时间的载体构成了牛顿关于时间联系的动人描述，而居于核心的是伽利略关于钟摆的伟大发现……科学迷们肯定会乐意随牛顿踏上一次轻松的时间之旅，去探寻人类记载时间的历史。

——**吉尔伯特·泰勒** 《书单》

你会发现这是一本自己喜欢的读物，书中随处可见趣味横生的动人描述。作者从独特的历史视角诠释了时间测量的问题，贯穿全书的是一个充满传奇色彩的偶然发现：17岁的伽利略注视着比萨大教堂天花板下高悬的树枝形吊灯，他惊奇地发现吊灯完成一次来回摆动所需的时间竟然与其摆动的幅度大小无关……作者以简洁、洗练的笔触向我们呈现了"谐振器"无所不在的等时性，并将其视为在我们解密大自然的征途中不可或缺的基本素材。

——**杰曼·科尼尔森** 《核心记者》

这是一本关于时间的书，行文简单明了又不乏令人兴趣盎然的描述：从牛顿、法拉第、爱因斯坦等科学巨匠的故事，到佛罗伦萨韦奇奥宫的单指针大钟，再到约翰·哈里森角逐英国经度奖的曲折经历，无疑都会帮你解开人类与时间之间那千丝万缕的情结，再现人类精确测量时间的漫漫征途。

——《金融时报》

罗杰·G.牛顿 美国印第安纳大学物理学系荣誉教授、《数学物理学杂志》编辑

项目策划：彭冬林 满兴远 / 责任编辑：程 蕾 / 装帧设计：牛茜茜



一个学术性教育性
出版机构

网址：http://www.fltrp.com



定价：19.00元